

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**



**Grado en Ingeniería en Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación**

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

**ALIMENTADORES PLANOS CONMUTABLES PARA  
SISTEMAS DE APUNTAMIENTO VARIABLE BASADOS EN  
LENTES PLANAS**

**Lucas Nicolas Soria Caporale**

**Tutor: Eduardo García Marín**

**Ponente: José Luis Masa Campos**

**JULIO 2019**



# **ALIMENTADORES PLANOS CONMUTABLES PARA SISTEMAS DE APUNTAMIENTO VARIABLE BASADOS EN LENTES PLANAS**

**AUTOR: Lucas Nicolas Soria Caporale**

**TUTOR: Eduardo García Marín**

**Trabajo realizado en grupo**



**Grupo de radio frecuencias, Antenas y Sistemas  
(RFCAS)**

**Dpto. de Tecnología electrónica y de las comunicaciones**

**Escuela Politécnica Superior**

**Universidad Autónoma de Madrid**

**Julio de 2019**



# Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado consta del diseño, simulación, fabricación y medida de un conjunto de elementos radiantes que alimentan a una lente plana y esta a su vez genera un haz de radiación muy directivo. Además, en función de qué elemento radiante se encuentre activo, la lente será capaz de radiar en direcciones diferentes del espacio. La banda donde opera este diseño se encuentra entre la K y Ka. Se llevará a cabo mediante tecnología de circuitos impresos (*microstrip*) con polarización lineal.

Puesto que el objetivo de este trabajo es realizar un conjunto de antenas con una red de conmutación para iluminar la lente, primero se realizó el diseño para el elemento unitario una vez conseguido, se pasó al diseño de la red de conmutación. Para la red de conmutación se valoran dos alternativas: una basada en diodos PIN y otra en un conmutador integrado. Se analizaron ambas en términos de complejidad, pérdidas y adaptación, concluyendo que la opción del conmutador es la más apropiada para el diseño. Debido a la complejidad de implementación de este chip, que es necesario hacerlo fuera de las instalaciones de la Escuela Politécnica Superior, la fabricación de la red de conmutación queda para trabajos futuros.

Una vez finalizada la fase de diseño y simulación, se pasó a la fase de fabricación, donde ha supuesto un reto, dado que la frecuencia de operación de la antena es elevada, su tamaño es muy reducido, por ello es muy sensible a posibles tolerancias de fabricación. Hasta ahora en el grupo RFCAS se había trabajado hasta la banda Ku en *microstrip*. Pasada la fabricación, llegamos a la medición de la antena y el conjunto de ellas, la medición en adaptación se pudo realizar en las instalaciones de la EPS, mientras que la medición para obtener el diagrama de radiación se tuvo que realizar en la Universidad de Granada.

Los resultados experimentales son positivos, validando experimentalmente la antena de lente como sistema de alta ganancia y apuntamiento variable.

## Palabras clave

Banda Ku, K, Ka, Impedancia de entrada, adaptación, diagrama de radiación, PIN, Acoplos, conmutador, agrupación o array de parches, parches apilados, lóbulo principal, lóbulos secundarios, desapuntamiento.



# Abstract

This Bachelor's Thesis consists on the design, simulation, fabrication and measurement of a set of radiating elements that feed a flat lens, which generates a directive radiation beam. In addition, depending on which radiating element is active, the lens will be able to radiate in different directions in space. The operating frequency band of this design is between the K and Ka. It will be developed in microstrip technology and the antenna will have linear polarization.

The objective of this work is to create a set of antennas with a switching network to illuminate the lens. Firstly, the design of the unitary radiating element is realized, and then the switching network is developed. Two alternatives are considered for the switching network: one is based on PIN diodes and the other one on an integrated switch. Both options were analyzed in terms of complexity, losses and impedance matching, concluding that the integrated switch option is the most appropriate for the design. Due to the complexity of the implementation of this chip, which must be made outside the premises of the Escuela Politécnica Superior, the implementation of the switching network remains for future work.

Once the design and simulation phases were finished, we passed to the manufacturing phase, which is a challenge. The reason for this is that the operating frequency of the antenna is high, thus its size is very small, so it is very sensitive to possible manufacturing tolerances. So far, the RFCAS research group had evaluated microstrip technology up to the Ku band. After manufacturing, the measurement of the unitary radiating element as well as the set of antennas were performed. The impedance matching measurement could be carried out at the EPS facilities, while the radiation measurements had to be made at the University of Granada.

The experimental results are positive, experimentally validating the lens antenna as a high gain system with beam steering capabilities.

# Keywords

Ku, K, Ka band, Input impedance, radiation chart of an antenna, PIN, coupler, commutator, active adaptation, phase shifter, patches array, staked array, first lobe, secondary lobes, steering.





## *Agradecimientos*

Empezaré diciendo que han sido los mejores años de mi vida. Ha sido un camino largo, pero al fin llego el momento. Y es hora de que toda esa gente que me ayudó a llegar a estar donde estoy se merece un hueco en este espacio.

Primero agradecer a mi familia, a mi madre, a mi padre, sin vosotros esto no sería posible. Vosotros mejor que nadie sabéis lo difícil que ha sido, pero ya está esto ha llegado a su fin, y como no, vosotros dos tenéis que estar aquí, los primeros porque os lo merecéis y por qué os quiero. A mi abuela que estando a 14.000 km de distancia siempre ha estado ahí, apoyándome y preocupándose por todo, muchas gracias por lo que has hecho y sigues haciendo. A mi hermana: *“Ornela, que esto sirva para que veas que se puede conseguir cualquier cosa que te propongas, mientras te guste lo que haces Te quiero.”*

Ricardo G. no tengo palabras para expresar lo importante que has sido, te quiero mucho hermano. Sonia C., por tratarme como un hijo, muchas gracias por todo.

Agradecer a mis amigos, a los colegas, a los chavales, a ti Jesús R. por todos esos momentos (que no han sido pocos), porque has estado en las buenas, en las malas y en las muy malas. Además de enseñarme a ser mejor *ingeniero*, me has enseñado a ser mejor persona, y te lo agradezco de todo corazón. A vosotros Jorge R., Cristian R. y David V., Adrián R. por hacer de esta etapa lo más ameno y divertido, por vuestros consejos y vuestro punto de vista tan distintivo. Creo que hemos formado una piña que va mucho más allá de este camino, y por todo eso y mucho más, gracias.

A mi tutor, Edu G. que sin él todo este trabajo solo sería parte de una idea, gracias por tu tiempo, tu dedicación, la confianza depositada, la profesionalidad y esa vocación que hace que todo sea más simple de lo que es. Obviamente he de agradecer a la persona que me enseñó este camino José Luis M. que sencillamente es un referente y un modelo para seguir, además de ser unos de los mejores en su campo y uno de los mejores profesores que he tenido. No me quiero olvidar de todos los docentes que dejaron un poco de ellos en mí como: Manuel H. que me enseñó el arte de la programación, Jorge R. que con su “... pues lo haces” logro más de lo que parece, a Luis S. que desde el primer año me dejó claro cual tenía que ser mi prioridad, Bazil T. con su manera de calcular los logaritmos de cabeza, Juan C. que lo dejó todo “cristalino”. Bueno a todos ellos y otros muchos más muchas gracias por ayudarme a terminar esta etapa.

Bueno y como he comentado anteriormente este ha sido un camino más largo de lo normal y cada año con más dificultades que el anterior pero también gracias a ello he podido conocer gente maravillosa como Mario G. que en estos últimos años ha sido un apoyo enorme (no solo académicamente, que también) y una persona con la que he podido contar siempre, un referente de buen estudiante, de buen trabajador... de buena gente. Javi G. aunque hayan sido pocos meses en esa empresa, todo ha sido muy intenso y bueno por eso apareces en este espacio, porque sin duda me ayudaste a ver las cosas de otra manera.

A Isabel C. y a Jesús P. por enseñarme valores, a tener siempre en mente cual es mi objetivo aparecéis en este trabajo, porque sí, porque os lo merecéis. A Celia P. porque has estado a mi lado durante gran parte del camino, me has aguantado, apoyado y sobre todo me has enseñado a ser mejor persona, gracias de corazón.

María T. no sabes lo que me alegro de que hayas llegado a mi vida, debo agradecerte todo lo que haces por mí, por estar conmigo día a día. Simplemente por hacerme feliz. Te quiero.



# INDICE DE CONTENIDOS

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1       | Introducción.....  | 1  |
| 1.1     | Motivación .....   | 1  |
| 1.2     | Objetivos.....   | 1  |
| 1.3     | Organización de la memoria .....   | 2  |
| 2       | Estado del arte .....  | 3  |
| 2.1     | Definición y características de una antena.....                          | 3  |
| 2.1.1   | Concepto de impedancia de antena. ....                                   | 3  |
| 2.1.2   | Coeficiente de reflexión y coeficiente de adaptación .....               | 4  |
| 2.1.3   | Parámetros S .....   | 4  |
| 2.2     | Tipos de antenas.....  | 5  |
| 2.2.1   | Antenas de parche .....  | 5  |
| 2.3     | Diagrama de radiación .....  | 6  |
| 2.3.1   | Característica del diagrama de radiación .....                           | 7  |
| 2.3.2   | Tipos de polarización .....  | 8  |
| 3       | Diseño de agrupación de alimentadores impresos para antena de lente..... | 11 |
| 3.1     | Consideraciones previas .....  | 11 |
| 3.2     | Elemento unitario.....   | 12 |
| 3.2.1   | Elección del sustrato .....  | 13 |
| 3.2.2   | Diseño de la antena de parche .....                                      | 13 |
| 3.2.3   | Línea de adaptación.....   | 18 |
| 3.2.3.1 | Línea de adaptación enterrada .....                                      | 19 |
| 3.2.3.2 | Línea de adaptación al a 50 ohm .....                                    | 20 |
| 3.2.4   | Adaptación y diagrama de radiación del elemento unitario.....            | 21 |
| 3.3     | Conjunto de parches.....   | 23 |
| 3.3.1   | Acoplos entre parches .....  | 23 |
| 3.3.2   | Adaptación del conjunto de parches .....                                 | 24 |
| 3.3.3   | Diagrama de radiación .....  | 24 |
| 3.4     | Red conmutación .....  | 25 |
| 3.4.1   | Diodos PIN.....  | 25 |
| 3.4.2   | Conmutador.....  | 27 |
| 3.4.3   | Comparativa diodos PIN vs conmutador .....                               | 29 |
| 3.4.4   | Conjunto de parches con conmutador de RF .....                           | 29 |
| 3.4.5   | Observaciones sobre el ensamblaje del conmutador de RF .....             | 30 |

|  |    |
|--|----|
| 3.5 Diseño final.....                          | 30 |
| 4 Fabricación y resultados experimentales..... | 33 |
| 4.1 Fabricación.....                           | 33 |
| 4.1.1 Elemento unitario .....                  | 33 |
| 4.1.2 Conjunto de parches más lente.....       | 34 |
| 4.1.2.1 Conjunto de parches .....              | 34 |
| 4.1.2.2 Lente .....                            | 35 |
| 4.2 Resultados Experimentales .....            | 36 |
| 4.2.1 Elemento unitario .....                  | 36 |
| 4.2.2 Conjunto de parches con lente .....      | 37 |
| 5 Conclusiones y trabajo futuro.....           | 39 |
| 5.1 Conclusiones .....                         | 39 |
| 5.2 Trabajo futuro .....                       | 39 |
| Referencias .....                              | 41 |
| Glosario .....                                 | 43 |

# INDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 2-1: CONCEPTO DE ANTENA [2].....   | 3  |
| FIGURA 2-2: PARCHES MICROSTRIP [5]. ....  | 6  |
| FIGURA 2-3: MODO DE RADIACIÓN DE UN PARCHE <i>MICROSTRIP</i> [6].....           | 6  |
| FIGURA 2-4: DIAGRAMA DE RADIACIÓN. ....   | 7  |
| FIGURA 2-5: 1) EJEMPLO DE PLANO H, 2) EJEMPLO DE PLANO E.....                   | 7  |
| FIGURA 2-6: PARÁMETROS DEL DIAGRAMA DE RADIACIÓN.....                           | 8  |
| FIGURA 2-7: TIPOS DE DIAGRAMAS [7]. ....  | 8  |
| FIGURA 2-8: TIPO DE POLARIZACIÓN [8].....                                       | 9  |
| FIGURA 3-1: DISEÑO COMPLETO. ....   | 11 |
| FIGURA 3-2: ELEMENTO UNITARIO.....  | 12 |
| FIGURA 3-3: PARCHE APILADO.....   | 12 |
| FIGURA 3-4: LÍNEA ENTERRADA. ....   | 13 |
| FIGURA 3-5: FASE DE LÍNEA DE LONGITUD $\Lambda_U$ .....                         | 14 |
| FIGURA 3-6: PARTES DEL PARCHE APILADO.....                                      | 14 |
| FIGURA 3-7: VARIACIÓN DEL LARGO INFERIOR ....                                   | 15 |
| FIGURA 3-8: VARIACIÓN DEL ANCHO INFERIOR. ....                                  | 15 |
| FIGURA 3-9: VARIACIÓN DEL LARGO SUPERIOR.....                                   | 16 |
| FIGURA 3-10: VARIACIÓN DEL ANCHO SUPERIOR. ....                                 | 16 |
| FIGURA 3-11: VARIACIÓN DE LA SEPARACIÓN.....                                    | 17 |
| FIGURA 3-12: ESQUEMÁTICO DEL PARCHE APLILADO. ....                              | 17 |
| FIGURA 3-13: CARTA DE SMITH DE LÍNEA MÁS PARCHE.....                            | 18 |
| FIGURA 3-14: DISEÑO DE LAS LÍNEAS DE ADAPTACIÓN. ....                           | 18 |
| FIGURA 3-15: LÍNEAS ENTERRADAS.....   | 20 |
| FIGURA 3-16: ADAPTACIÓN Y CARTA DE SMITH DEL PARCHE MÁS LÍNEAS ENTERRADAS. .... | 20 |

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 3-17: LÍNEA ADAPTADORA A $50 \Omega$ .....   | 21 |
| FIGURA 3-18: ADAPTACIÓN DEL ELEMENTO UNITARIO. ....   | 21 |
| FIGURA 3-19: CARTA DE SMITH DEL ELEMENTO UNITARIO. ....   | 21 |
| FIGURA 3-20: REPRESENTACIÓN DEL DIAGRAMA DE RADIACIÓN DEL ELEMENTO UNITARIO.....  | 22 |
| FIGURA 3-21: PLANO H DEL ELEMENTO UNITARIO. ....  | 22 |
| FIGURA 3-22: PLANO E DEL ELEMENTO UNITARIO .....  | 22 |
| FIGURA 3-23:CONJUNTO DE PARCHES APILADOS.....   | 23 |
| FIGURA 3-24: ACOPLS EN EL PARCHES 1. ....   | 23 |
| FIGURA 3-25: ACOPLS EN EL PARCHES 2. ....   | 24 |
| FIGURA 3-26: ADAPTACIÓN PARCHES 1 Y 2.....  | 24 |
| FIGURA 3-27: DIAGRAMA DE RADIACIÓN A 26 GHz.....  | 24 |
| FIGURA 3-28: ESQUEMA DE DIODOS PIN EN RED DE ALIMENTACIÓN.....  | 25 |
| FIGURA 3-29: PARÁMETROS S DEL DIODO PIN PROPORCIONADOS POR EL FABRICANTE, PARA ESTADO DE CONDUCCIÓN (IZQUIERDA) Y CORTE (DERECHA). .... | 26 |
| FIGURA 3-30: LÍNEA CON DIODO PIN.....   | 26 |
| FIGURA 3-31: SCHEMATIC DE LÍNEA CON DIODO PIN.....  | 27 |
| FIGURA 3-32: DIODO PIN EN ESTADO DE CONDUCCIÓN. ....  | 27 |
| FIGURA 3-33: DIODO PIN EN ESTADO DE CORTE. ....   | 27 |
| FIGURA 3-34: LÍNEAS MICROSTRIP PARA EL CONMUTADOR. ....   | 28 |
| FIGURA 3-35: SCHEMATIC LÍNEAS CON CONMUTADOR.....   | 28 |
| FIGURA 3-36: PARÁMETROS S DE LÍNEAS MÁS CONMUTADOR. ....  | 28 |
| FIGURA 3-37: LÍNEAS CON CONMUTADOR Y PARCHES.....   | 29 |
| FIGURA 3-38: ADAPTACIÓN DE LÍNEAS CON CONMUTADOR Y PARCHES. ....  | 30 |
| FIGURA 3-39: DISEÑO FINAL CON ESTRUCTURA PARA LENTE.....  | 30 |
| FIGURA 3-40: ADAPTACIÓN DE LOS 4 PARCHES .....  | 31 |
| FIGURA 3-41: COMPONENTE COPOLAR EN EL PLANO H.....  | 31 |

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 4-1: ELEMENTO UNITARIO FABRICADO (IZQUIERDA), PARCHE INFERIOR FABRICADO (DERECHA). | 33 |
| FIGURA 4-2: CONJUNTO DE PARCHES FABRICADOS.   | 34 |
| FIGURA 4-3: CONJUNTO DE PARCHES CON ESTRUCTURA DE SUJECCIÓN DE LENTE.                     | 35 |
| FIGURA 4-4: LENTE (IZQUIERDA), LENTE CON <i>FOAM</i> (DERECHA).                           | 35 |
| FIGURA 4-5: CONJUNTO DE PARCHES CON ESTRUCTURA Y LENTE.                                   | 36 |
| FIGURA 4-6: ADAPTACIÓN DEL PARCHE UNITARIO, SIMULACIÓN VS FABRICACIÓN.                    | 36 |
| FIGURA 4-7: DIAGRAMA DE RADIACIÓN A) PLANO H, B) PLANO E A 26 GHz.                        | 37 |
| FIGURA 4-8: GANANCIA DEL PARCHE.  | 37 |
| FIGURA 4-9: MEDICIÓN DEL CONJUNTO DE PARCHES EN ADAPTACIÓN                                | 37 |
| FIGURA 4-10: DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA COMPLETA EN PLANO H A 26 GHz.             | 38 |
| FIGURA 4-11: GANANCIA DEL CONJUNTO DE PARCHES CON LENTE.                                  | 38 |





# 1 Introducción

---

## 1.1 Motivación

En la situación en la que nos encontramos, en pleno auge de la tecnología 5G es necesario el uso de sistemas radiantes (o antenas) capaces de satisfacer esas necesidades de comunicación, que permite mayor velocidad, menor latencia y un gran número de dispositivos conectados, entre otras ventajas.

Las antenas necesarias deben tener una versatilidad, como la capacidad de reorientar el diagrama de radiación y tener varios canales transmisión y recepción como hacen las antenas MIMO. Los sistemas MIMO tienen múltiples antenas, y por tanto puedes transmitir y recibir varias líneas de información a la vez.

Para el 5G se usan frecuencias elevadas para obtener anchos de banda mayores. Hay que recalcar que la electrónica necesaria para construir antenas conmutadas lleva a diseños complejos. Si unimos estos dos últimos puntos el resultado es un alto coste y, como se quiere construir un número elevado de estaciones base, que estos diseños sean costosos es un inconveniente para las empresas.

Una alternativa a estos diseños es el que se plantea en este TFG, los alimentadores con la lente permiten obtener diagramas de radiación muy directivos y distintas direcciones de apuntamiento. Esto se consigue con antenas sencillas y sin apenas tener electrónica gracias a la lente.

En el grupo de RFCAS se está explorando la línea de trabajo con lentes y como se ha comentado anteriormente los alimentadores deben ser sencillos, por lo tanto, se implementarán con una técnica de fabricación de bajo coste (*microstrip*) todo esto servirá para validar experimentalmente las características de la lente.

## 1.2 Objetivos

El objetivo del trabajo es diseñar y fabricar un conjunto de elementos radiantes conmutable, para su uso en combinación con una lente dieléctrica plana, logrando así una antena directiva con direcciones de apuntamiento variable, operativo en la banda entre K y Ka de frecuencias (24-28 GHz) que es una de las candidatas para implementar futuros sistemas 5G de alta capacidad. El diseño del alimentador para la lente se tiene que ajustar a las restricciones impuestas por ese diseño ya existente de la lente. Con este punto se quiere investigar si la lente sirve para distintos tipos de alimentadores con las limitaciones que tiene dicha lente (espacio entre elementos radiantes y altura).

Se desarrollará un sistema basado en tecnología de circuitos impresos cuya novedad principal será que la antena estará diseñada a una frecuencia de 26 GHz, donde hasta el momento no se habían utilizado este tipo de tecnología de fabricación para antenas a frecuencias tan elevadas, en la Escuela Politécnica Superior de la UAM. Este Trabajo de Fin de Grado supone nuevos retos que conlleva la fabricación en estas frecuencias, debido a las reducidas dimensiones, sensibilidad a errores de fabricación, etc.

Se fabricará el conjunto de parches y la estructura de soporte de la lente como se comentó anteriormente, para poder así realzar medidas y hacer una comparación con los resultados obtenidos de las simulaciones.

### **1.3 Organización de la memoria**

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1: Introducción.** Motivación, objetivos y organización de la memoria
- **Capítulo 2: Estado del arte.** Definición y características de una antena, tipos de una antena, y diagramas de radiación.
- **Capítulo 3: Diseño de agrupación de alimentadores impresos para antena de lente.** Consideraciones previas, elemento unitario, conjunto de parches, red de conmutación, diseño final.
- **Capítulo 4: Fabricación y resultados experimentales.** Fabricación y resultados experimentales
- **Capítulo 5: Conclusiones y trabajo futuro.** Conclusiones y trabajo futuro.

## 2 Estado del arte

### 2.1 Definición y características de una antena

Una antena es un dispositivo metálico perteneciente a un sistema transmisor o receptor capaz de radiar y recibir ondas de radio electromagnéticas y que, además, adapta la salida del transmisor o la entrada del receptor al medio. Las antenas se diseñan para que las ondas oscilen a una determinada frecuencia. La banda más común son las microondas, que cubren desde los 300 MHz hasta los 300 GHz [1].

| Banda     | frec. mínima | frec. máxima | $\lambda$ mínima | $\lambda$ máxima |
|-----------|--------------|--------------|------------------|------------------|
| <b>L</b>  | 1 GHz        | 2 GHz        | 30 cm            | 15 cm            |
| <b>S</b>  | 2 GHz        | 4 GHz        | 15 cm            | 7.5 cm           |
| <b>C</b>  | 4 GHz        | 8 GHz        | 7.5 cm           | 3.75 cm          |
| <b>X</b>  | 8 GHz        | 12.4 GHz     | 3.75 cm          | 2.42 cm          |
| <b>Ku</b> | 12.4 GHz     | 18 GHz       | 2.42 cm          | 1.66 cm          |
| <b>K</b>  | 18 GHz       | 26.5 GHz     | 1.66 cm          | 1.11 cm          |
| <b>Ka</b> | 26.5 GHz     | 40 GHz       | 1.11 cm          | 7.5 mm           |
| <b>mm</b> | 40 GHz       | 300 GHz      | 7.5 mm           | 1 mm             |

#### 2.1.1 Concepto de impedancia de antena.

La impedancia de entrada de la antena  $Z_A'$  es aquella definida en sus bornas. No obstante, la línea de transmisión que une la antena al generador también puede considerarse parte de la antena, que quedaría definida por  $Z_A$ , como se puede observar en la Figura 2-1. La resistencia de antena  $R_A$  (dado que  $Z_A = R_A + j \cdot X_A$  y por lo general  $X_A = 0$ ) se puede separar en una resistencia de pérdidas y otra de radiación, y relacionar ambas con las potencias radiadas y disipadas

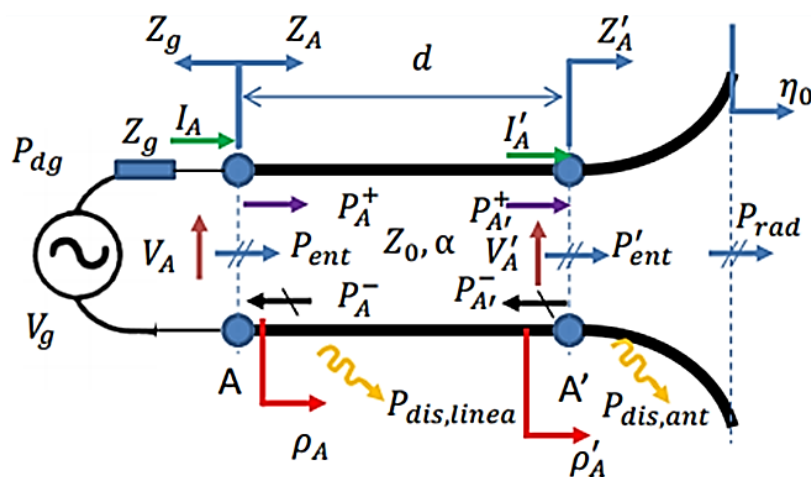


Figura 2-1: Concepto de antena [2].

### 2.1.2 Coeficiente de reflexión y coeficiente de adaptación

El coeficiente de reflexión relaciona la amplitud de la onda reflejada con la amplitud de la onda incidente. Suele representarse con  $\rho$  que es un número complejo y viene dado por la siguiente expresión:

$$\rho := \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2,1)$$

Donde  $Z_L$  es la impedancia de carga al final de una línea de transmisión, y  $Z_0$  es la impedancia característica de la línea de transmisión, también el coeficiente de reflexión se puede calcular gráficamente usando una carta de Smith.

Por otro lado, tenemos el coeficiente de adaptación que nos informa de lo bien adaptado que este el circuito diseñado, o dicho de otra forma la potencia que aprovecha el diseño del generador [3].

$$\Gamma := \frac{Z_L - Z_g^*}{Z_L + Z_g} \quad (2,2)$$

### 2.1.3 Parámetros S

Al igual que con cualquier otro circuito, debe haber una forma común de S expresar las propiedades o el comportamiento eléctrico de un sistema de RF. Los niveles de potencia pueden definirse como la onda de potencia incidente  $a_k$  (2,3) y la onda de potencia reflejada  $b_k$  (2,4).

$$a_k := \frac{v_k + i_k \cdot Z_{0k}}{\sqrt{8 \cdot Z_{0k}}} \quad (2,3)$$

$$b_k := \frac{v_k - i_k \cdot Z_{0k}}{\sqrt{8 \cdot Z_{0k}}} \quad (2,4)$$

Donde  $i_k$  y  $Z_{0k}$  son la intensidad de corriente y la impedancia de referencia en la puerta  $k$  respectivamente. Estas ondas de potencia están relacionadas, por la matriz de parámetros S.

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_n \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{pmatrix} \quad (2,5)$$

De la matriz de parámetros S, mostrada anteriormente (2.5) se puede deducir el parámetro de dispersión  $S_{ij}$  que viene dado por la ecuación (2.6).

$$S_{ji} := \frac{b_j}{a_i} \quad (2,6)$$

Y de esta manera y suponiendo que  $a_k = 0$  y que  $k \neq i$ , cargando las puertas restantes con el valor de la impedancia  $Z_{0k}$  obtenemos los llamamos coeficientes de reflexión a los  $S_{ii}$ , y

coeficientes de transmisión a los  $S_{ij}$ . Dichos coeficientes están directamente relacionados con pérdidas de retorno y las pérdidas de inserción, respectivamente. Donde su connotación física es la siguiente:[4]

$$|S_{ii}|^2 = \frac{\text{Potencia reflejada en la puerta } i}{\text{Potencia del generador en la puerta } i}$$

$$|S_{ij}|^2 = \frac{\text{Potencia entregada a la puerta } j}{\text{Potencia del generador en la puerta } i} \quad j \neq i$$

## 2.2 Tipos de antenas

La tipología de las antenas es la siguiente:

- **Antenas de hilo o lineales**, son aquellas que están formadas por un hilo conductor. El radio del hilo es menor de  $\lambda_0$ , los ejemplos más representativos de este tipo de antena son los dipolos y monopolos.
- **Antenas impresas**, son aquellas que están implementadas sobre sustrato impreso, cuyo espesor de conductor es menor de  $0.2 \cdot \lambda_0$ . El ejemplo más claro y el que se utilizará en este TFG son las antenas de parche *microstrip*.
- **Antenas de apertura**, en este tipo de antena la onda se radia a partir de una apertura física, normalmente rectangular. Los ejemplos más utilizados de este tipo son antenas de bocina, reflectores y combinaciones de ambos.
- **Agrupaciones de antenas**, es el conjunto de dos o más antenas mencionadas anteriormente.
- **Antenas inteligentes**, son agrupaciones de antenas que su principal acción es modificar sus propiedades de radiación dependiendo de exigencias externas.

### 2.2.1 Antenas de parche

Las antenas de parche son antenas fabricadas sobre tecnología de circuito impreso. Los espesores que pueden utilizarse están en el rango entre  $0.005 \cdot \lambda_0$  y  $0.2 \cdot \lambda_0$ . Se enumerará las características principales que tienen este tipo de antenas:

- Antenas planas de bajo perfil, bajo coste.
- El ancho banda es estrecho y con limitación de potencia
- Los sustratos que se suelen utilizar tienen como constante dieléctrica  $1 \leq \epsilon_r \leq 12$ .
- Permiten una fácil integración con la red de alimentación.
- Las aplicaciones principales donde se utiliza este tipo de antena son en telefonía móvil, comunicaciones por satélite, redes inalámbricas, radar, radionavegación.

La mayor parte del campo se genera en el sustrato y, en menor medida, en el aire. Por esto, se suele considerar que el modo propagado por las líneas *microstrip* no es puramente TEM (Transversal Electromagnético), sino un quasi-TEM.

La forma de los parches *microstrip* viene dada según el diseñador, aunque las más comunes son la rectangular o la circular. La alimentación de este tipo de antenas suele ser a través de una línea *microstrip* o coaxial. En este trabajo se ha implementado un tipo de alimentación a través de una línea *microstrip*.

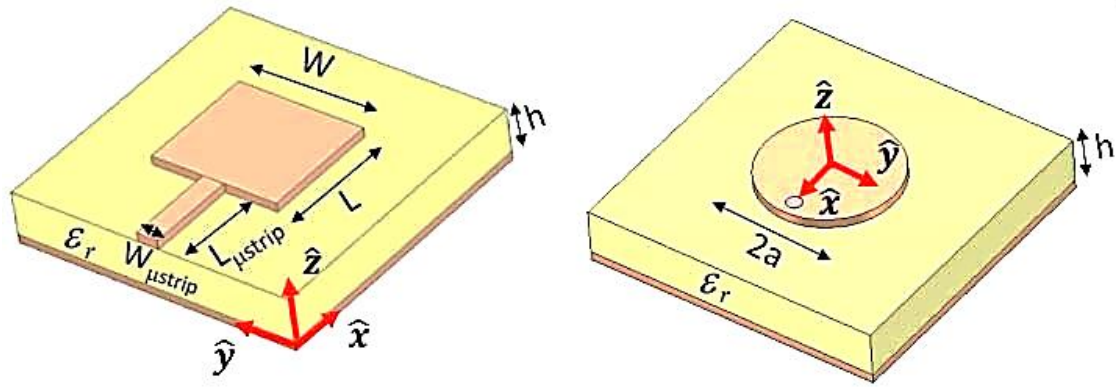


Figura 2-2: Parches *microstrip* [5].

En el parche, el plano de masa y los costados del dieléctrico, que forman una ranura entre el plano de masa y el parche se pueden considerar una cavidad resonante con dos paredes eléctricas perfectas (y cuatro paredes magnéticas perfectas en las cuatro ranuras, en esta cavidad se pueden definir modos resonantes, que tendrán unos campos en el interior dieléctrico del parche, hay que tener en cuenta que en esta cavidad solo puede haber modos TM. El modo fundamental es el  $TM_{100}$  y su campo dentro de la cavidad particularizado en las ranuras es la siguiente:

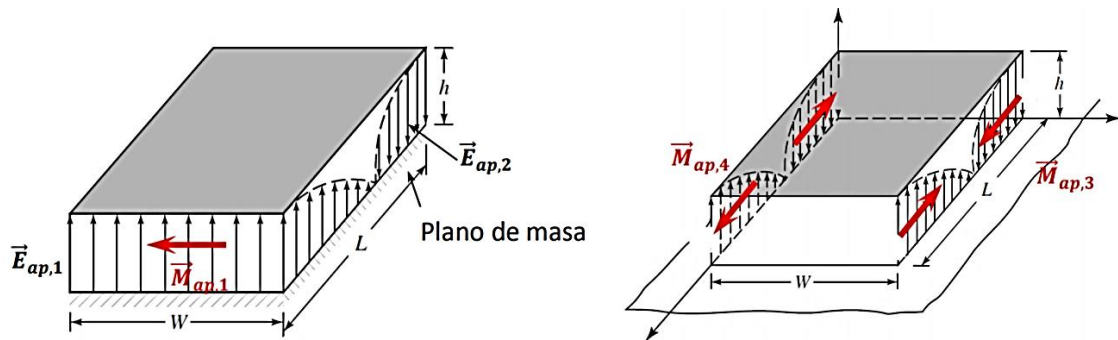


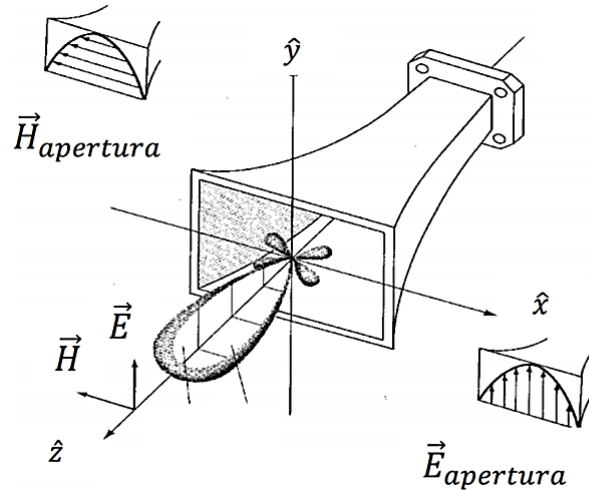
Figura 2-3: Modo de radiación de un parche *microstrip* [6].

Como se ve en la Figura 2-3 las ranuras 1 y 3 radian, eso quiere decir que radia por las caras donde se definen la longitud del parche, mientras que la 3 y 4 cancelan su densidad de corriente magnética y no radian.

Como se contaba anteriormente una de las desventajas de las antenas de parche, es el ancho de banda que genera es muy pequeño y su nivel de potencia máxima es limitado. Una de las maneras de solventar este problema, es añadir un parche apilado a la antena de parche inicial, los cuales si tienen dimensiones parecidas generan dos resonancias muy próximas en frecuencia, resultando un ancho de banda combinado mucho mayor.

## 2.3 Diagrama de radiación

El diagrama de radiación es la representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en campo lejano en función de las coordenadas espaciales.

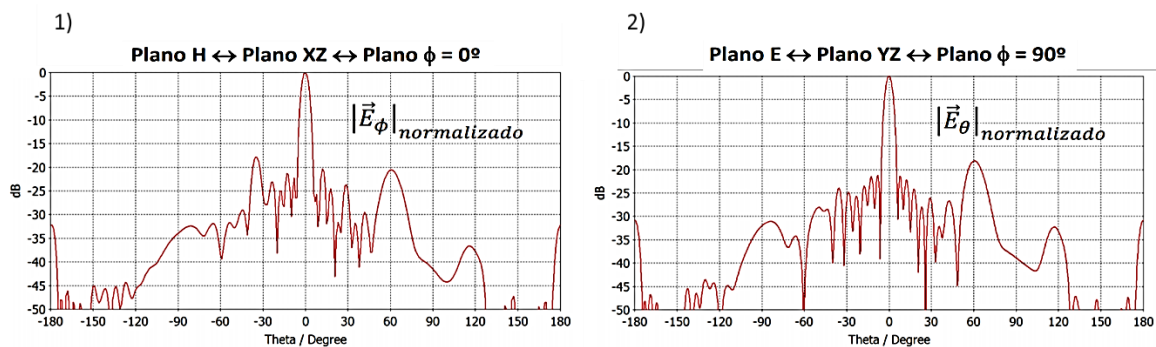


**Figura 2-4: Diagrama de radiación.**

El diagrama de radiación se suele representar de forma tridimensional. Pero una manera de realizar también la representación del diagrama de radiación es en 2 dimensiones, dando planos donde se pueden dar en coordenadas polares o cartesianas y se suele expresar en decibelios (dB). Se suelen utilizar dos planos principales que representan la mayor parte de la información, el plano E y el plano H. Tomando como referencia la Figura 2-4 se tiene que:

**Plano E:** Contiene al vector  $\vec{E}$  que es el vector del campo eléctrico y la dirección de máxima radiación. El plano que contiene al vector  $\vec{E}$  es el plano YZ, para la Figura 2-4 que el campo  $\vec{E}$  va en la dirección y la dirección de máxima radiación es según z, usando las coordenadas esféricas significa el plano  $\Phi=90^\circ$  y  $\theta$  variable.

**Plano H:** Contiene al vector  $\vec{H}$  que es el vector del campo magnético y la dirección de máxima radiación. En este caso es plano XZ el que contiene al vector  $\vec{H}$  que va en la dirección x y la máxima radiación que va según z, que se corresponde en esta ocasión con las coordenadas cartesianas al plano  $\Phi=0^\circ$  y  $\theta$  variable.



**Figura 2-5: 1) Ejemplo de Plano H, 2) Ejemplo de plano E.**

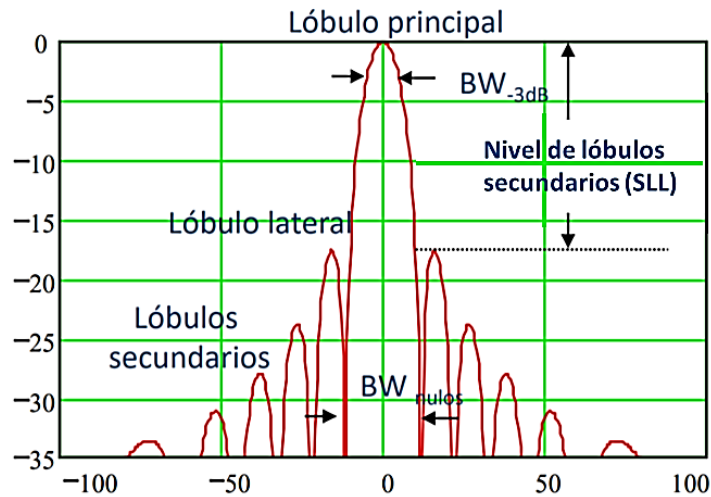
### 2.3.1 Característica del diagrama de radiación

Partiendo del diagrama de radiación se obtienen una serie de parámetros que se deben saber interpretar correctamente para poder obtener la información que se requiere de la antena.

**Lóbulo:** Porción del diagrama delimitada por regiones de radiación más débil.

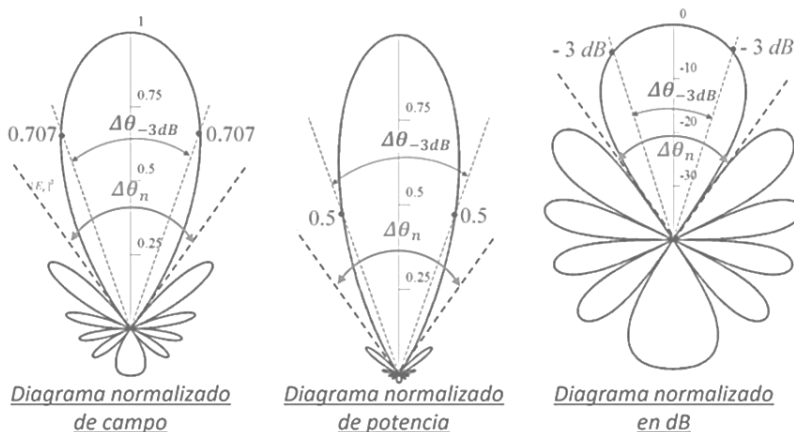
- Lóbulo principal: contiene la dirección de máxima radiación.
- Lóbulos secundarios: los lóbulos distintos del principal
  - Lóbulos laterales: los lóbulos secundarios que se encuentran adyacentes al principal.
  - Lóbulo posterior: lóbulo situado aprox. a  $180^\circ$  respecto del principal.
- Nivel de lóbulos secundarios: relación entre el nivel del lóbulo principal y el lóbulo lateral de mayor nivel.

**Dirección de apuntamiento** es la dirección máxima de radiación.



**Figura 2-6: Parámetros del diagrama de radiación.**

**Ancho de haz a -3dB:** Nos indica la separación angular, esta puede medirse en una caída de a -3 dB respecto del máximo, o bien entre nulos.



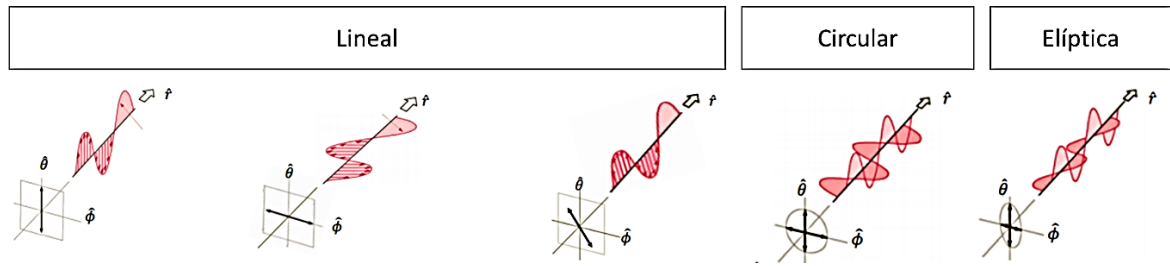
**Figura 2-7: Tipos de diagramas [7].**

### 2.3.2 Tipos de polarización

La polarización indica la forma que describe el extremo del vector del campo eléctrico en el tiempo, visto desde la antena transmisora. Se considera que la polarización es vista por un observador desde la antena. Se pueden distinguir en los siguientes tipos de polarización. El campo eléctrico radiado se suele expresar en coordenadas esféricas, se



distinguen dos componentes principales,  $E_\theta$  y  $E_\phi$ . El desfase existente entre las mismas es relevante de cara a determinar la polarización de la antena, y se expresa como  $\Delta\varphi$ .



**Figura 2-8: Tipo de polarización [8].**

- Polarización lineal: El campo proyectado sobre el plano del observador lo hace sobre una recta (*Axial Ratio* ( $AR$ )=  $\infty$ ).
- Polarización circular: El extremo del campo proyectado sobre el plano del observador se mueve sobre una circunferencia ( $AR = 1$ ). Dicho movimiento puede ser:
  - Polarización circular a derechas:  $E_\phi = E_\theta$  y  $\Delta\varphi = -90^\circ$
  - Polarización circular a izquierdas:  $E_\phi = E_\theta$  y  $\Delta\varphi = 90^\circ$
- Polarización elíptica: El extremo del campo proyectado sobre el plano del observador se mueve sobre una elipse ( $1 < AR < \infty$ ). Dicho movimiento puede ser:
  - Polarización elíptica a derechas:  $\Delta\varphi < 0$
  - Polarización elíptica a izquierdas:  $\Delta\varphi > 0$



### 3 Diseño de agrupación de alimentadores impresos para antena de lente.

Teniendo en cuenta que la sección del diseño es la principal de este TFG, aquí se plantearán todos los aspectos de dicho diseño y por ello se dividirá en 5 segmentos desde el diseño y adaptación del elemento radiante hasta el diseño final.

La finalidad de este trabajo es la creación de un conjunto de parches alimentadores de una lente que modifica la ganancia y el apuntamiento entre otras características del conjunto antes mencionado. Cada antena de parche está en una posición distinta respecto de la lente. De esta manera, en función de qué antena de parche se active, la lente será iluminada en una zona distinta, y generará un haz principal de radiación con dirección de apuntamiento variable. Para seleccionar qué parche ilumina la lente, se diseñará una red de conmutación.

La lente ya fue previamente diseñada en el grupo de investigación RFCAS y una de las primeras restricciones para el buen funcionamiento de la lente, es que las antenas deben equidistar 11mm entre ellas. La separación que tiene la lente con respecto al conjunto de parches alimentadores es de unos 52mm.

A continuación, en la Figura 3-1 se muestra como ha sido el resultado final del diseño y los distintos desapuntamientos que tiene cada parche.

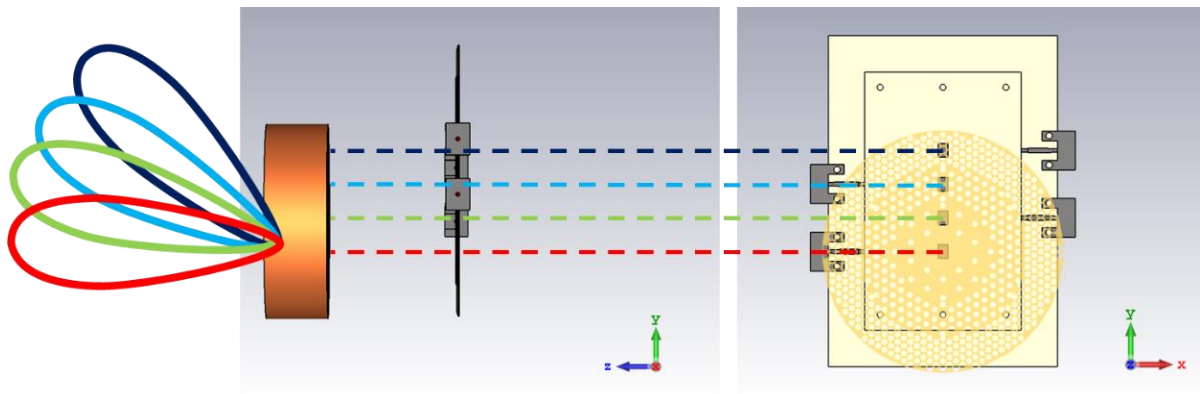


Figura 3-1: Diseño completo.

#### 3.1 Consideraciones previas

Antes de introducirse en los detalles del diseño de la antena, se va a mencionar las especificaciones que tiene dicho diseño:

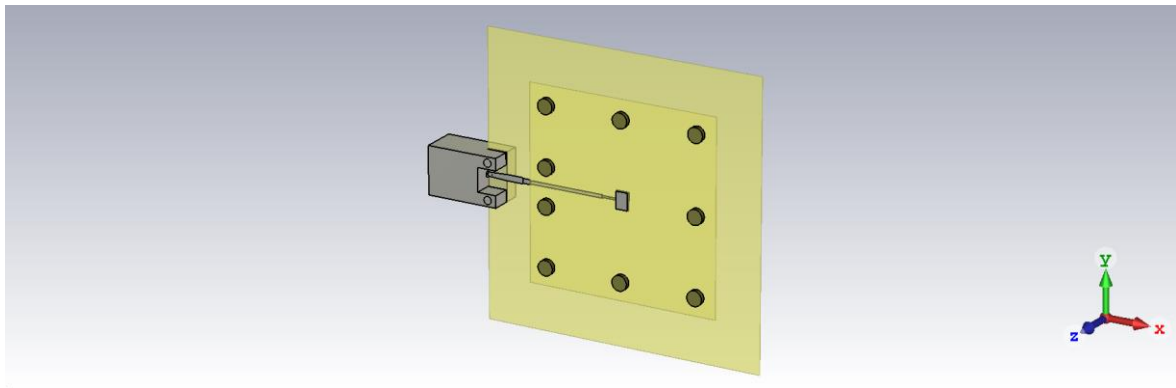
- La banda de trabajo que tiene esta antena parte de los 24.25 GHz y llega hasta los 28.23 GHz dando así un ancho de banda que se acerca a los 4 GHz. La frecuencia central de dicho diseño es 26 GHz
- Se realizará sobre Taconic TLY-5A con una constante dieléctrica  $\epsilon_r = 2.17$ .
- La red de conmutación se realizará con la misma tecnología con la que se ha hecho la antena, tecnología de circuitos impresos, cuya gran ventaja es el bajo coste y su disponibilidad en las instalaciones de la Escuela.
- En un principio se ha realizado un array conmutado de 1x4 elementos, de manera que puedan lograrse 4 direcciones de apuntamiento distintas con la lente, según qué elemento sea excitado. Pero con la intención de que más adelante se realice uno de 1x7.

- La polarización de los elementos radiantes es lineal según el eje cartesiano x.
- Para realizar el diseño se ha utilizado CST Microwave Studio y ADS.

### 3.2 Elemento unitario

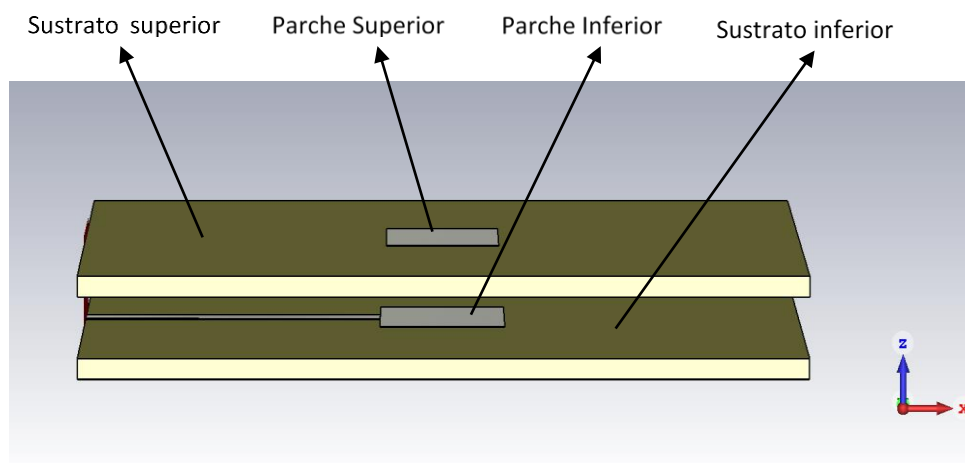
El objetivo es crear un conjunto de parches para iluminar la lente desde varias posiciones, y el paso inicial es diseñar uno de esos parches de manera aislada. Por lo tanto, esta fase se explicará el diseño del elemento unitario paso a paso, esto conlleva desde la elección del sustrato hasta la adaptación del elemento radiante. También se explicarán los resultados de sus principales características de radiación y cuál ha sido la adaptación obtenida.

En la Figura 3-2, se representa una imagen del diseño del elemento unitario, donde se puede observar que esta el parche apilado, líneas adaptadoras y el conector coaxial.



**Figura 3-2: Elemento unitario.**

Se va a usar un elemento unitario de tipo parche *microstrip* apilado, para aumentar el ancho de banda con respecto a un parche convencional. El parche apilado consiste en superponer dos parches metálicos de dimensiones similares, de forma que resuenen a dos frecuencias próximas y así aumente el ancho de banda del conjunto, como se puede apreciar en la Figura 3-3.



**Figura 3-3: Parche apilado.**

### 3.2.1 Elección del sustrato

Dado que el conjunto de alimentadores está pensado para trabajar a una frecuencia de 26 GHz, se utilizó el teflón como sustrato para diseñarla y fabricarla, ya que es el material con menos pérdidas que disponemos. El espesor de dicho sustrato viene dado a que cuanto más pequeño sea el espesor con el que se trabaje menor será la anchura de las pistas, y al tener que hacer una pista de  $50\ \Omega$  para colocar el conector, la anchura que se obtiene si se escoge un espesor mayor al elegido sería muy ancha, y por cuestiones de espacio nos conviene minimizar el tamaño de las pistas *microstrip*. Por lo tanto, el espesor del sustrato es 0.508mm.

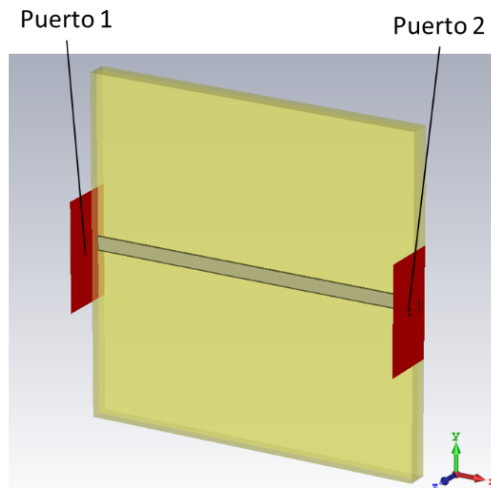
### 3.2.2 Diseño de la antena de parche

Para comenzar el diseño del parche se realizó una primera estimación para que este resuene a la frecuencia deseada. Se calculó primero la longitud del parche tomando la siguiente ecuación [9].

$$f_d := \frac{c_0}{2 \cdot L_{\text{eff}} \cdot \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \longrightarrow L_{\text{eff}} := \frac{c_0}{2 \cdot f_d \cdot \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} = 3.914 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (3,1)$$

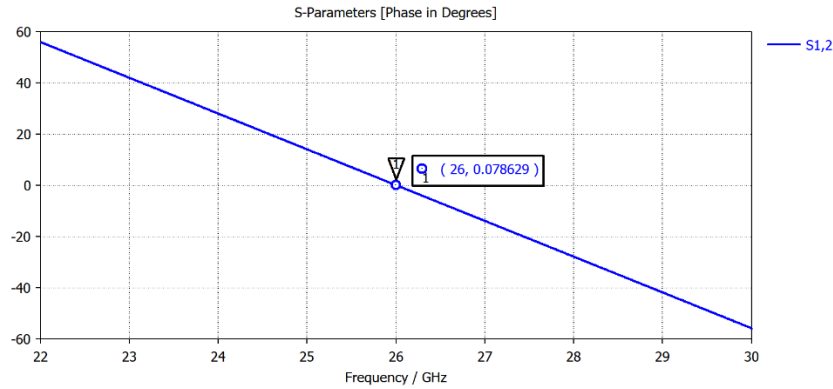
El primer paso para diseñar el elemento radiante unitario es conocer la impedancia de entrada del parche, de cara a diseñar la red de adaptación de impedancias necesaria hasta la entrada del elemento, que será un conector coaxial de 50 ohm. Para conocer esa impedancia de entrada del parche, se debe excitar mediante una línea *microstrip* de longitud  $\lambda$ , de manera que a la entrada de esta veas replicada la impedancia de entrada del parche. Se debe mencionar también que, al tratarse de una antena de parche apilado, existirá un sustrato dieléctrico sobre la pista *microstrip* que excita el parche inferior, por lo que no será una línea *microstrip* canónica rodeada de aire por encima, sino que tendrá teflón.

Para hallar una línea con una longitud de  $\lambda_u$  se diseñó una línea enterrada de un ancho de 0,65mm e impedancia de  $77.7+1.12j\ \Omega$  entre los sustratos que se han elegido previamente, obteniendo así la siguiente estructura:



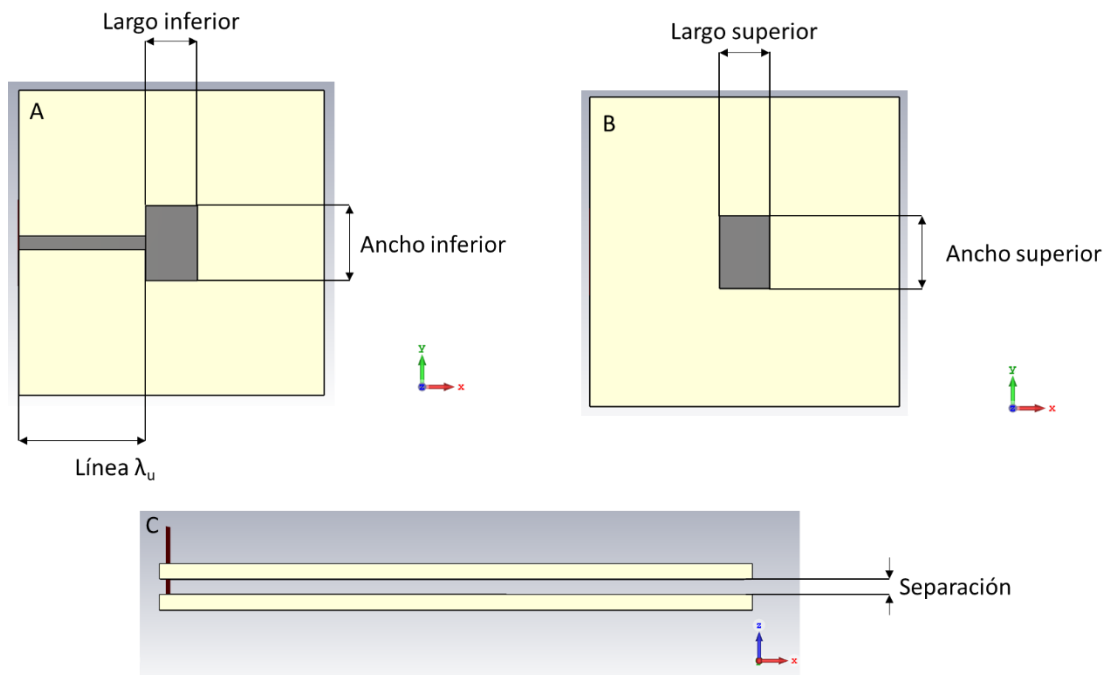
**Figura 3-4: Línea enterrada.**

Partiendo del diseño de la Figura 3-4 al simular se debe ver que el desfase a la frecuencia deseada es de  $0^\circ$ , para que la línea diseñada sea una línea de longitud  $\lambda_u$ . Y como se puede observar en la gráfica de la Figura 3-5 para una longitud de línea de 7.96mm se consigue  $0.07^\circ$  a 26 GHz.



**Figura 3-5: Fase de línea de longitud  $\lambda_u$ .**

Tomando como referencia el valor obtenido en la ecuación (3,1), donde la  $\epsilon_{\text{eff}}$  es la misma que  $\epsilon_r$ , y teniendo en cuenta que esta ecuación se utiliza para diseñar antenas de parche simple, se realizó un primer diseño de un parche rectangular apilado con el valor de  $L_{\text{eff}}$ . Se fue optimizando el diseño inicial hasta que ambos parches resuenen a una frecuencia de cercana a la de diseño y así obtener dos resonancias y por lo tanto más ancho de banda.

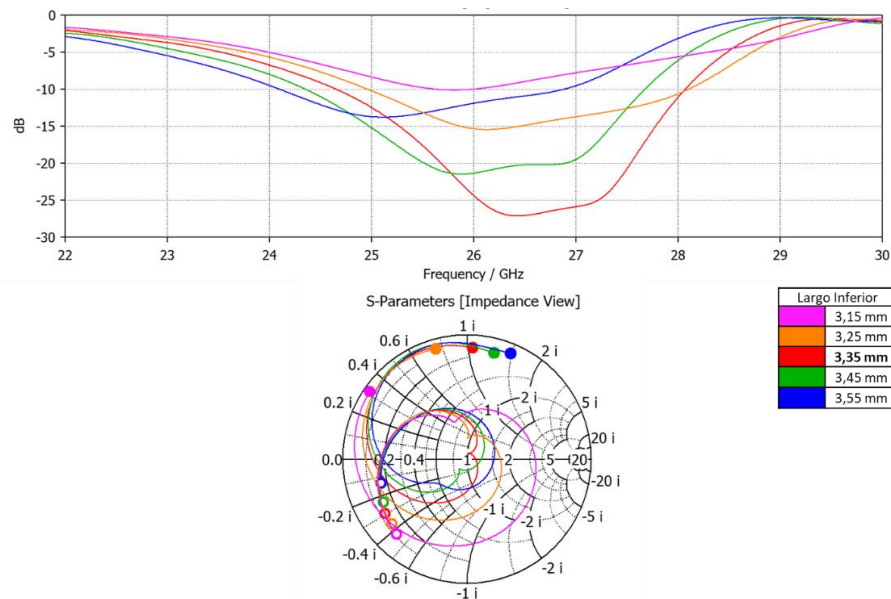


**Figura 3-6: Partes del parche apilado.**

En la Figura 3-6 se puede apreciar tres imágenes del parche apilado, en la imagen A se muestra el sustrato inferior con la línea de transmisión anteriormente calculada y el parche inferior, en la imagen B se puede ver el sustrato superior con el parche superior y en la imagen C se muestra ambos sustratos con un *gap* de aire.

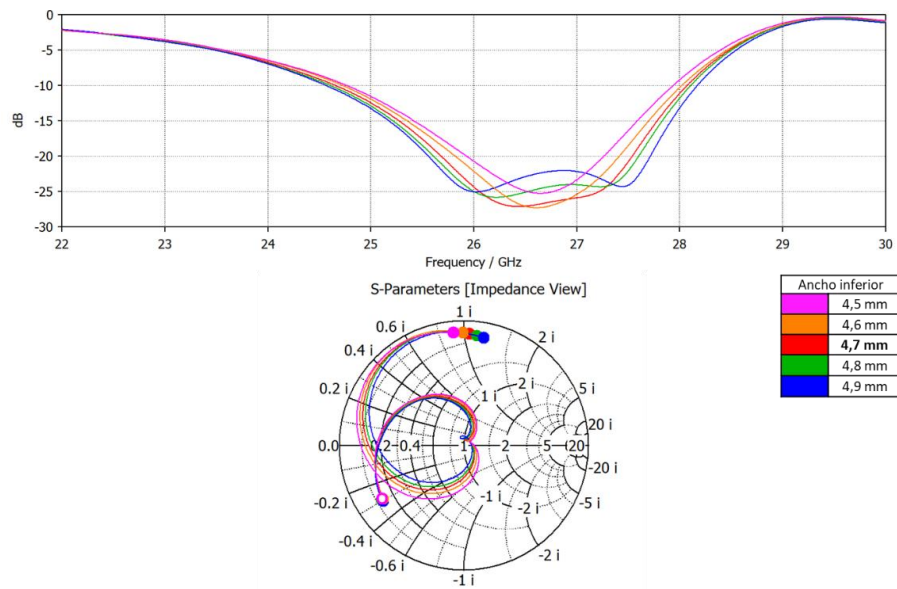
A continuación, se mostrarán como cambiando ligeramente las variables de la Figura 3-6 la adaptación y el ancho de banda varía. Se realizará un barrido en torno a la variable final del parche. Se cambiarán primero las variables del sustrato inferior, después la del parche superior y finalmente la separación entre ellos.

En la gráfica de la donde se modifica el largo inferior del parche, se puede observar que a medida que nos alejamos del valor final (3,35 mm) tomado la adaptación empeora considerablemente, también se puede ver que la adaptación empeora en la carta de Smith, alejándose del centro.



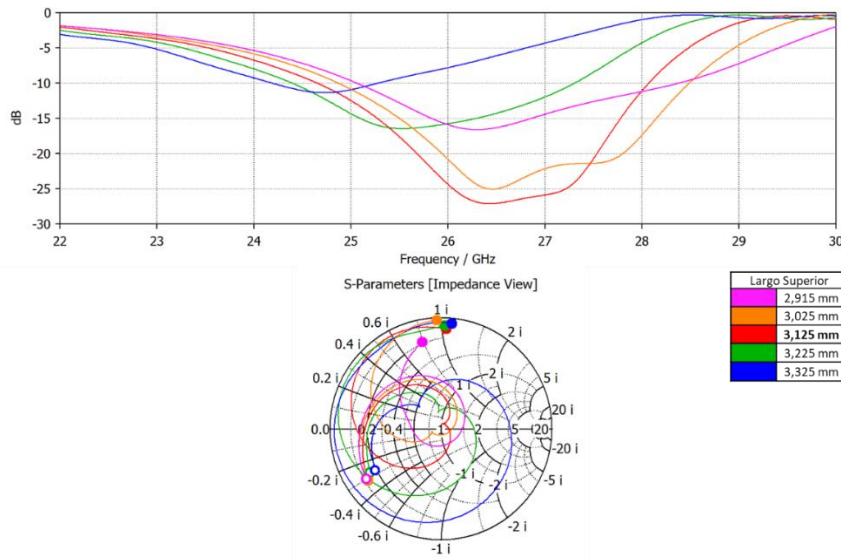
**Figura 3-7: Variación del largo inferior**

Como se puede apreciar en la Figura 3-8, al modificar la anchura se puede observar que la impedancia se modifica en parte real. Esto te sirve para ajustar la impedancia de entrada del parche al valor que más te beneficie de cara al diseño de elemento ya con red adaptadora a 50 ohm.



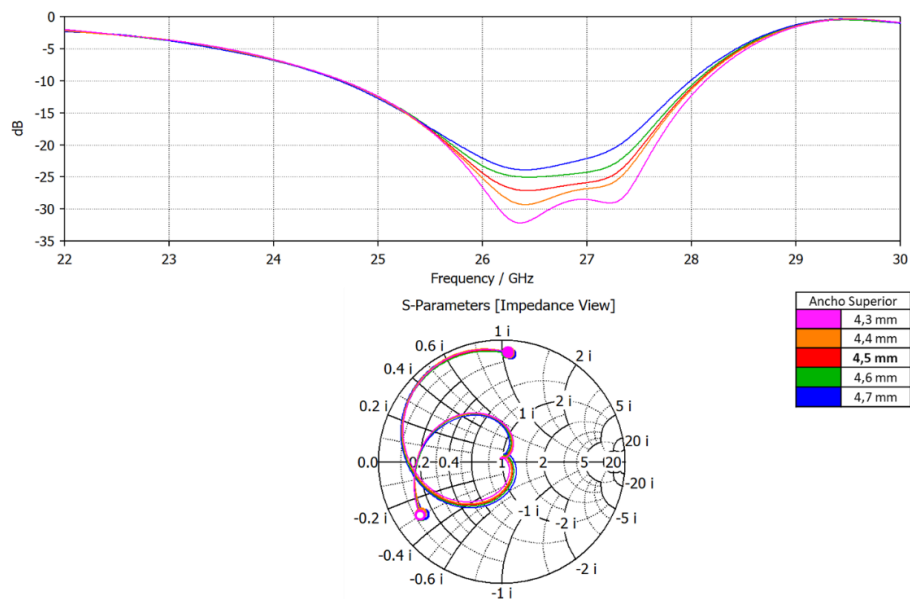
**Figura 3-8: Variación del ancho inferior.**

En la Figura 3-9 se varia la longitud, sabiendo que la longitud del parche superior debe ser distinta a la del inferior pero muy próxima, ya que de lo contrario el funcionamiento conjunto de ambos parches sería erróneo y se tendría una adaptación pobre. del parche superior, fijándonos primero en la adaptación que se consigue, se puede ver que se desadapta rápidamente con muy pocas variaciones en la longitud, lo que se ve también en la carta de Smith cuando las líneas se alejan del centro.



**Figura 3-9: Variación del largo superior.**

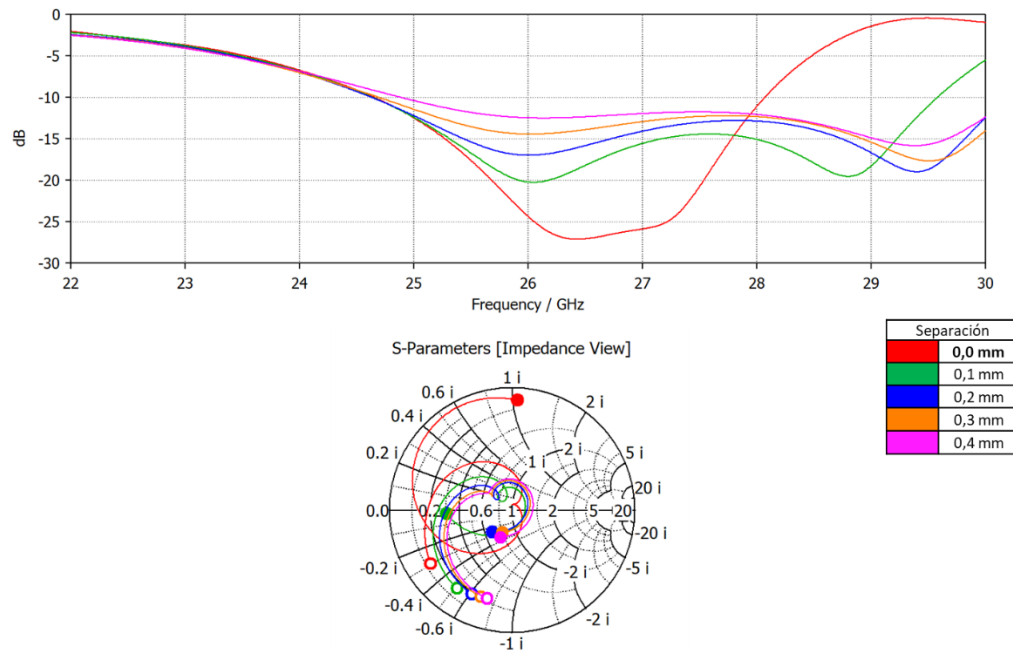
Viendo ahora la variación de la anchura, esta vez del parche superior donde se muestra las adaptaciones en la Figura 3-10, se puede observar una desadaptación muy parecida a la de la Figura 3-8, donde esta vez disminuyendo un poco la anchura se marca más la doble resonancia, pero estas se alejan entre ellas cuando se quiere adaptar el parche a la impedancia del conector.



**Figura 3-10: Variación del ancho superior.**



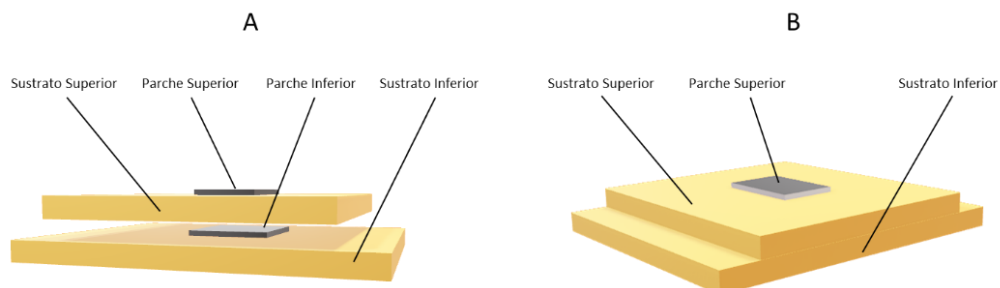
Observando la Figura 3-11 en la que se representa la adaptación que tiene el parche apilado cuando alejamos un sustrato del otro, se puede ver que la desadaptación es muy brusca, si nos fijamos concretamente en la línea verde, que es una separación de apenas 0,1mm se ve que aparece una doble resonancia pero muy alejada la una de la otra. En carta de Smith se ve también que empeora la adaptación, alejándose mucho del centro de la carta.



**Figura 3-11: Variación de la separación.**

Por lo tanto, la antena consta de un parche inferior de dimensiones 3,35x4,7mm, y de un parche superior 3,125x4,5mm. La distancia entre los dos elementos radiantes es de 0.508mm, esta medida es el espesor del sustrato utilizado, lo que quiere decir que la distancia entre el sustrato de arriba con el de abajo es de 0mm, por consiguiente, el parche inferior está totalmente enterrado.

La Figura 3-12 representa un esquemático del parche apilado que se ha diseñado, en el esquemático A tiene una separación de aire entre ambos sustratos, para facilitar la visión de todos los elementos de la antena. Recordemos que esta separación no existirá en el diseño final de la antena. El esquemático B representa como queda finalmente el parche apilado, donde se ve que el parche inferior queda atrapado entre los dos sustratos.

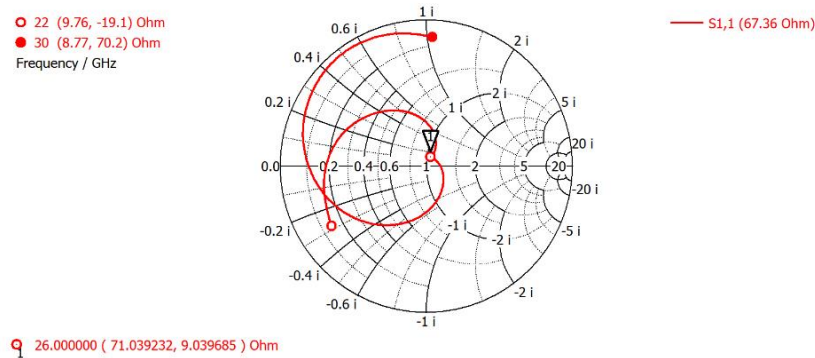


**Figura 3-12: Esquemático del parche apilado.**

Como se mencionó anteriormente es necesario saber la impedancia de entrada del parche para poder diseñar las líneas de adaptación necesarias para transformar la impedancia hasta un valor deseado de 50  $\Omega$ , que permitirá el uso de un conector coaxial para medir la antena.

Y para hallar la impedancia de entrada del parche se debe alimentar exactamente con una línea de transmisión de una longitud de  $\lambda_u$ , dado que para esta longitud la línea refleja en su extremo la impedancia de la antena. Esto se realiza porque no se puede poner un puerto directamente sobre el parche.

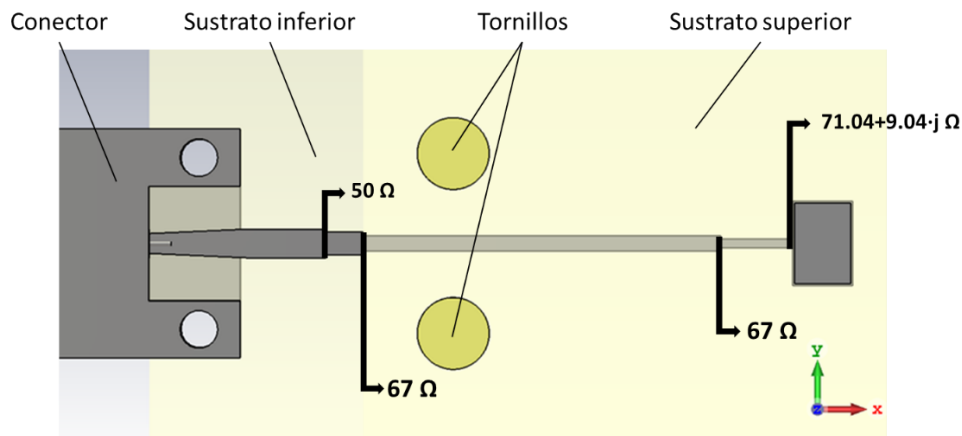
La impedancia que se obtiene al simular el parche apilado es la que viene representada en la carta de Smith de la Figura 3-13, dicha carta nos da la impedancia que toma el parche en todo el rango de frecuencias que hemos tomado para la simulación, que va desde los 22 GHz hasta los 30 GHz, La impedancia que se obtiene a la frecuencia de diseño esta toma un valor de  $71.04+9.04j \Omega$ .



**Figura 3-13: Carta de Smith de línea más parche.**

### 3.2.3 Línea de adaptación.

Dado que el conector que se utilizará es de  $50 \Omega$  es necesario diseñar una adaptación de la impedancia del parche a la impedancia del conector mencionado, como se ha podido ver en el apartado anterior la impedancia que tenemos es del parche es  $71.04+9.04j \Omega$ . En un primer momento se quiso adaptar directamente con un  $\lambda/4$ , después de la línea de  $\lambda_u$  del parche, pero el ancho de banda no era el deseado. Por ello se llevó a cabo otro diseño, para aumentar el ancho de banda, primero aumentando la impedancia y después adaptándola a la impedancia del conector, así se aumentaría el ancho de banda.

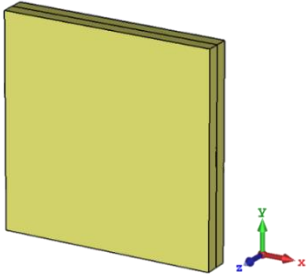
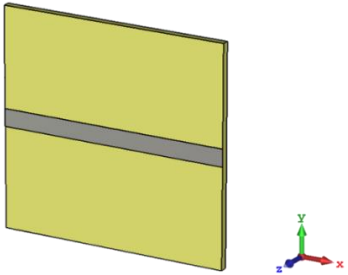
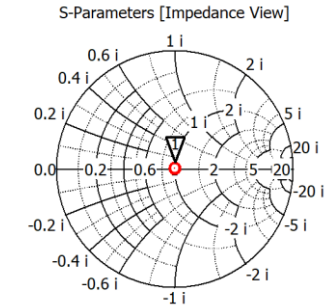
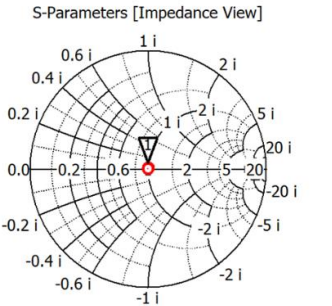


**Figura 3-14: Diseño de las líneas de adaptación.**

Como se comentó anteriormente se tiene que colocar un conector coaxial de  $50 \Omega$  para medir la antena. Este conector debe estar fijado físicamente al sustrato inferior, lo que exige retirar parte del sustrato superior en la zona próxima al conector. Por tanto, la línea

*microstrip* que va desde el parche al conector tendrá un cambio de impedancia en el punto donde termine el sustrato superior, lo cual, hay que tener en cuenta que parte de la red de adaptación está enterrada y la otra parte al aire.

En la siguiente tabla se muestra un ejemplo de la diferencia entre una línea *microstrip* de anchura 0.65mm y longitud  $2 \cdot \lambda_u$  enterrada y al aire.

| Línea enterrada   | Línea al aire  |
|---|--|
|    |    |
|  <p>Q 26.000000 ( 77.699874, 1.115994 ) Ohm</p> |  <p>Q 26.000000 ( 82.972037, 0.620460 ) Ohm</p> |

Como se puede apreciar para la misma anchura de línea y longitud, cuando esta está enterrada la impedancia que tenemos es de  $77.7 + j1.12 \Omega$  en cambio cuando esta al aire la impedancia es de  $82.97 + j0.62 \Omega$ . Por lo tanto, la red de adaptación tendrá varios tramos, uno en la zona enterrada bajo el sustrato superior, y otra ya en la zona despejada en las proximidades del conector.

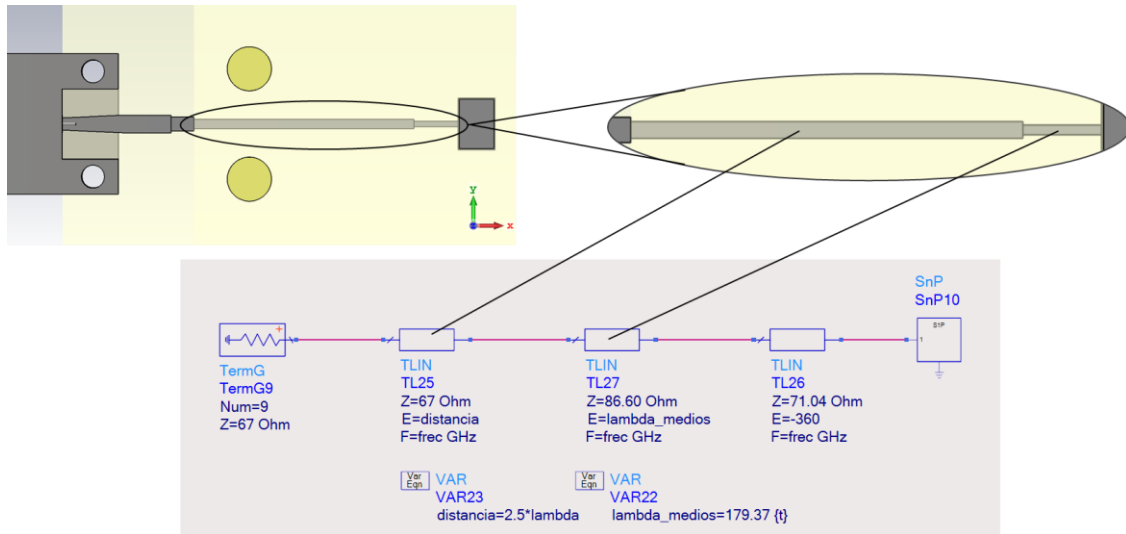
### 3.2.3.1 Línea de adaptación enterrada

En esta sección se lleva a cabo el diseño de una red adaptadora para ganar más ancho de banda, para ello se exportó los parámetros S1P del parche apilado con las dimensiones finales más la línea  $\lambda_u$  realizada en CST y se utilizó ADS para ver cómo conseguir el máximo de banda. En ADS se eliminará circuitalmente el tramo de línea *microstrip* de longitud  $\lambda_u$ , pues éste sólo es útil para poder conocer la impedancia de entrada del parche en CST, pero no será necesario que exista en el diseño final.

Por tanto, en ADS se deshace el camino eléctrico hasta el borde del parche, y ahí se introduce las líneas adaptadoras. Se diseñó una red adaptadora con dos transformadores lambda cuartos, donde la impedancia intermedia sería un valor a medio camino entre la del parche y los 67 ohm que has escogido.

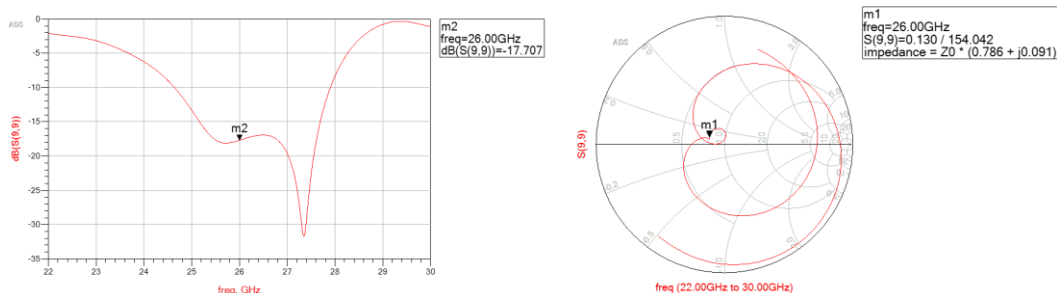
Sin embargo, se observó que se lograba más banda si la adaptación se hacía primero incrementando la impedancia, y luego disminuyéndola. La impedancia que deja la línea enterrada debe ser una impedancia cercana a los  $50 \Omega$  del conector, dado que más adelante

se tendría que adaptar, por lo tanto, se adaptó a una impedancia de  $67 \Omega$  y después se hizo una línea de longitud  $2.5 \cdot \lambda_u$  que mantiene dicha impedancia, porque la presencia física del conector puede interferir en la radiación del parche, y que ello que exige alejar una cierta distancia prudencial de dicho conector con el parche.



**Figura 3-15: Líneas enterradas.**

En la Figura 3-16 tomada de ADS se aprecia el proceso anteriormente narrado, en el extremo de la derecha se puede apreciar el parámetro S1P del parche (exportado desde la simulación de CST), se usa una línea de longitud negativa de  $\lambda_u$ , para situarnos justo en el extremo del parche, dado que el fichero S1P contempla la línea de alimentación  $\lambda_u$  y partiendo de ese punto colocar las líneas antes mencionadas, terminando en una impedancia de  $67 \Omega$ . La adaptación que se consigue con estas líneas es la que se muestra en la Figura 3-19, que está representada en magnitud (dB) y en carta de Smith.



**Figura 3-16: Adaptación y carta de Smith del parche más líneas enterradas.**

### 3.2.3.2 Línea de adaptación al a 50 ohm

La línea de adaptación que se hace sin sustrato encima es un  $\lambda/4$ , que ve en un extremo la impedancia que deja la línea soterrada ( $67 \Omega$ ) y en el otro extremo una línea de impedancia característica igual a la impedancia del conector, que se recuerda que son  $50 \Omega$ , esto quiere decir el transformador lambda cuartos tiene una impedancia de  $57.6 \Omega$ . En consecuencia, nos deja una línea que tiene una longitud de 2,1mm y una anchura de 1,273mm.

La línea de impedancia  $50 \Omega$ , tiene una anchura y una longitud 1,606mm y 9,8mm respectivamente. Debido a que la anchura es demasiado grande y al poner el conector sobre la pista se cortocircuitaría el conductor interno del coaxial con el externo. Por ello, se ha

tenido que realizar una disminución progresiva de la anchura de la pista (*taper*) para poner el conector mencionado, esto nos deja con una anchura final de pista de 1,106mm.

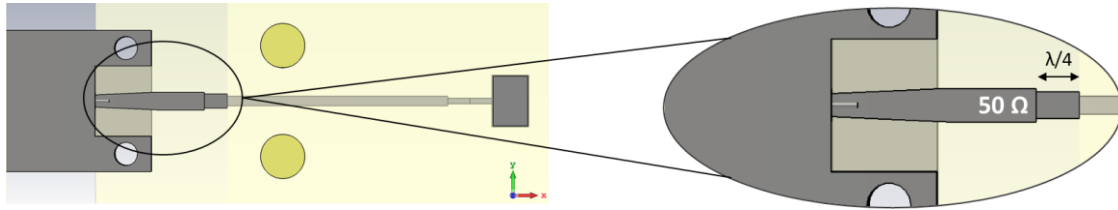


Figura 3-17: Línea adaptadora a 50 Ω.

### 3.2.4 Adaptación y diagrama de radiación del elemento unitario

Visto todo lo anterior, es el momento de ver cómo se comporta el elemento unitario, el parche apilado junto a las líneas de adaptación, como se aprecia en la Figura 3-2. Primero se mostrará una gráfica con la adaptación que tiene el elemento unitario en magnitud.

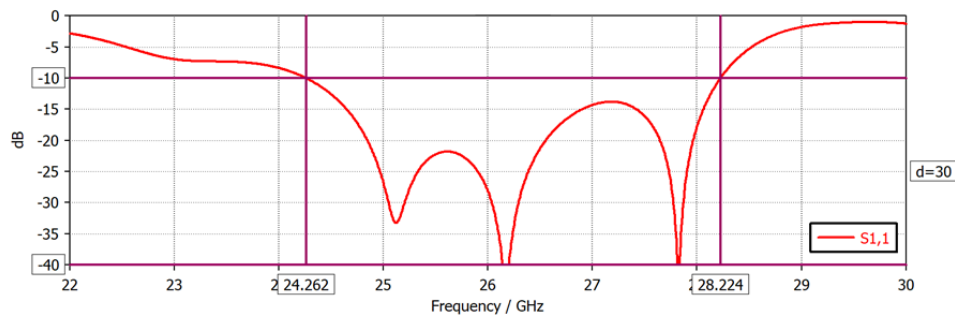


Figura 3-18: Adaptación del elemento unitario.

Como se puede observar el elemento unitario del array está adaptado en una banda que alcanza casi los 4 GHz a -10 dB, como se mencionó en las condiciones previas. Además, hay que observar que se obtiene un ancho de banda de 2.3 GHz a -15 dB.

En la carta de Smith de la Figura 3-19 podemos ver cómo se comporta la impedancia del parche junto con las líneas de adaptación en todo el rango de frecuencias. Teniendo en cuenta que cuantas más frecuencias estén próximas al centro de la carta mejor adaptación se conseguirá. Y como se puede apreciar haciendo zoom en la zona central de la carta podemos ver que se adapta a varias frecuencias. Para nuestra frecuencia de diseño, obtenemos una impedancia de  $47.25 + 3.37j \Omega$ .

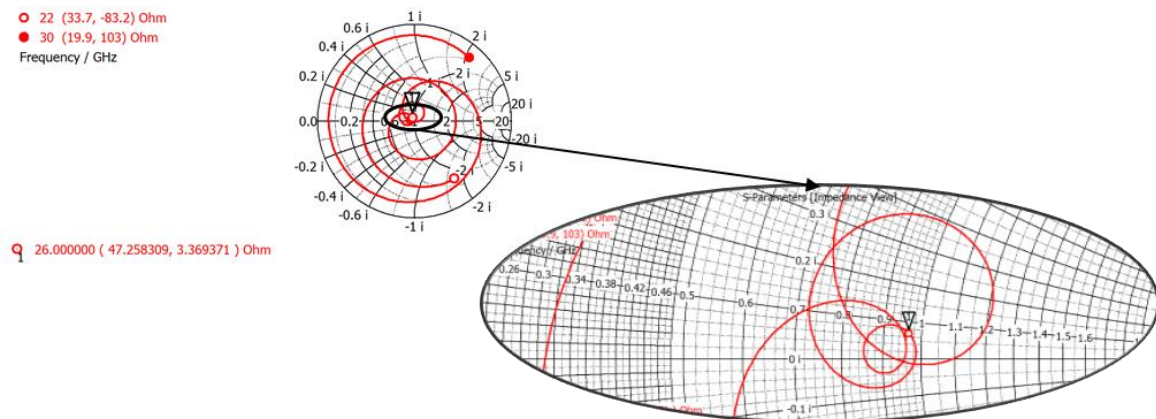
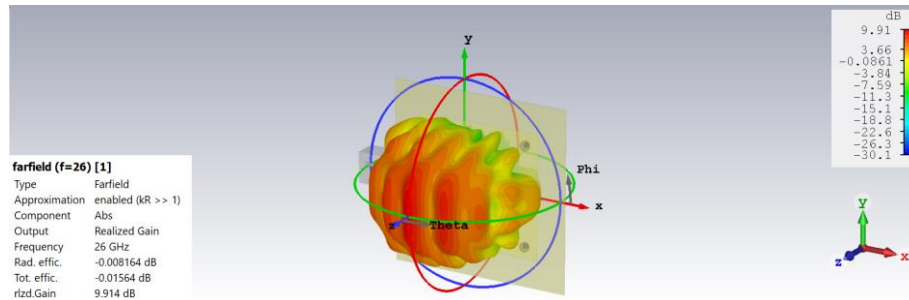


Figura 3-19: Carta de Smith del elemento unitario.

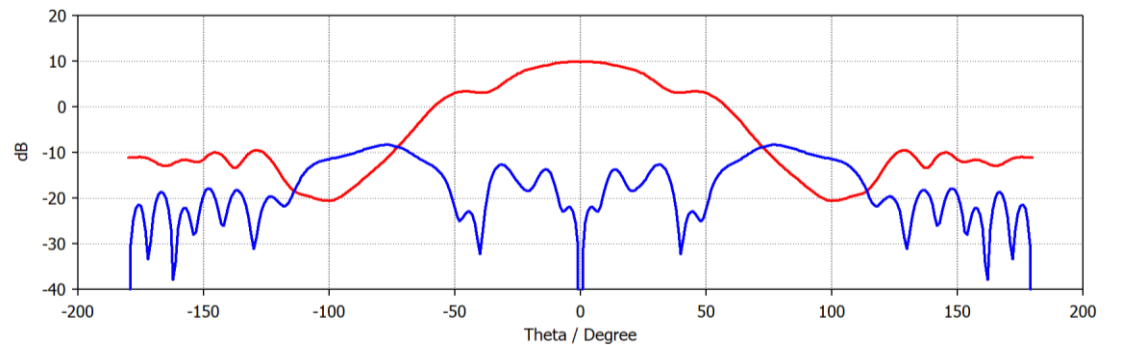
La Figura 3-20 muestra una representación en 3D del diagrama de radiación que tiene el elemento unitario. Se observa que en la dirección de apuntamiento es broadside (según +z), y la ganancia del parche apilado alcanza los 9,92 dB.



**Figura 3-20: Representación del diagrama de radiación del elemento unitario.**

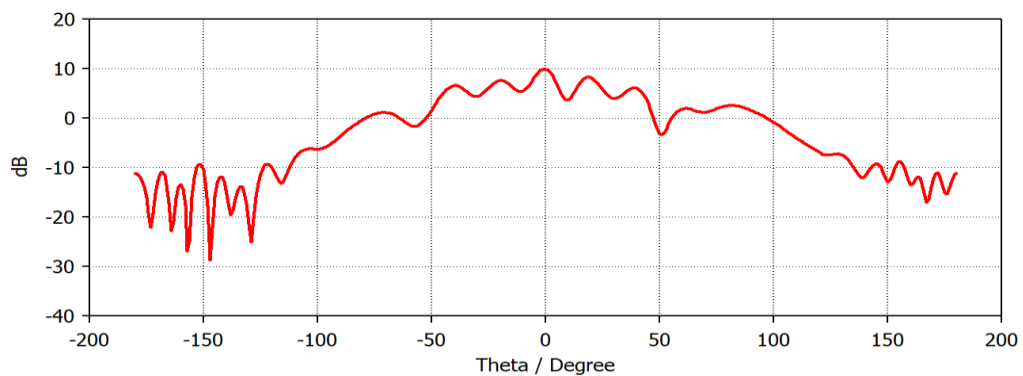
Ahora se van a mostrar los planos principales de radiación, el plano H es el plano YZ dado que la polarización del campo eléctrico radiado por el parche va en dirección de x. Y el plano E que será los cortes del diagrama de radiación en el plano XZ.

En la gráfica de la Figura 3-21 se muestra en rojo la componente copolar del plano H y en azul la componente contrapolar.



**Figura 3-21: Plano H del elemento unitario.**

En el plano E, la componente contrapolar es inferior a los -40 dB por lo tanto en la Figura 3-22 no se aprecia, por otro lado, podemos ver que la componente copolar representada en color rojo muestra un rizado y una asimetría. Esto se debe al efecto de bordes que produce el plano de masa.



**Figura 3-22: Plano E del elemento unitario**

### 3.3 Conjunto de parches

En este punto se verá la agrupación de parches que se utilizará como alimentadores de la lente. Como muestra la Figura 3-23, en la que se puede observar cuatro parches alineados a lo largo del eje y, los cuales se alimentan por las mismas líneas *microstrip*. La separación de los parches es de 11mm como se mencionó anteriormente, se recuerda que esta separación la viene limitada por la lente.

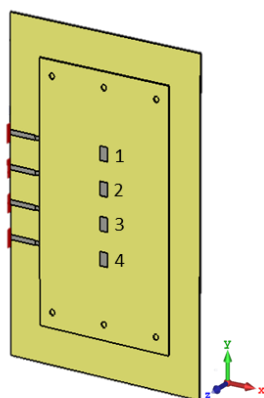


Figura 3-23: Conjunto de parches apilados.

Simulando el conjunto de parches de la imagen anterior (Figura 3-23) obtenemos los siguientes resultados, primero se observarán los acoplos para el parche 1 y seguidamente para el parche 2. Después de ver los acoplos correspondientes, se pasará a ver la adaptación que tienen ambos parches.

#### 3.3.1 Acoplos entre parches

Como se adelantó en el punto anterior, en esta parte se verán los acoplos que tienen los parches, al tener una estructura simétrica y al alimentar los parches de igual manera los acoplos que sufren el parche 1 y 2 serán los mismos acoplos que tendrán los parches 3 y 4.

Se puede apreciar en la Figura 3-24, los acoplos que sufre el parche 1, y también se puede ver que dichos acoplos van disminuyendo progresivamente a medida que los parches se van alejando, como no podía ser de otra forma.

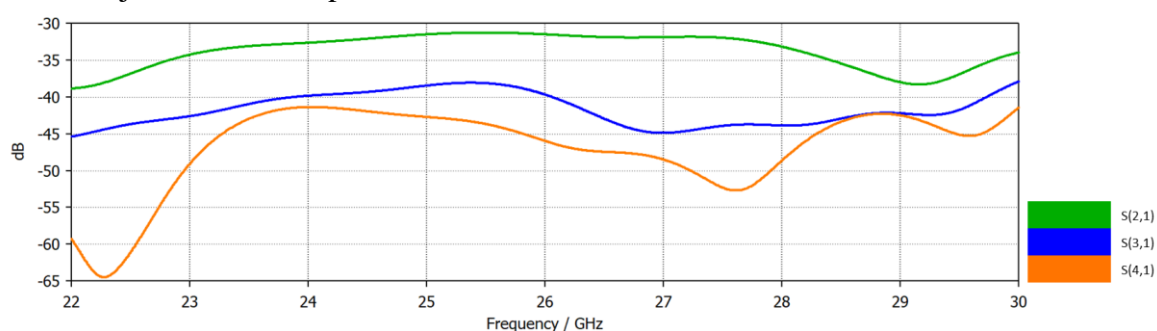
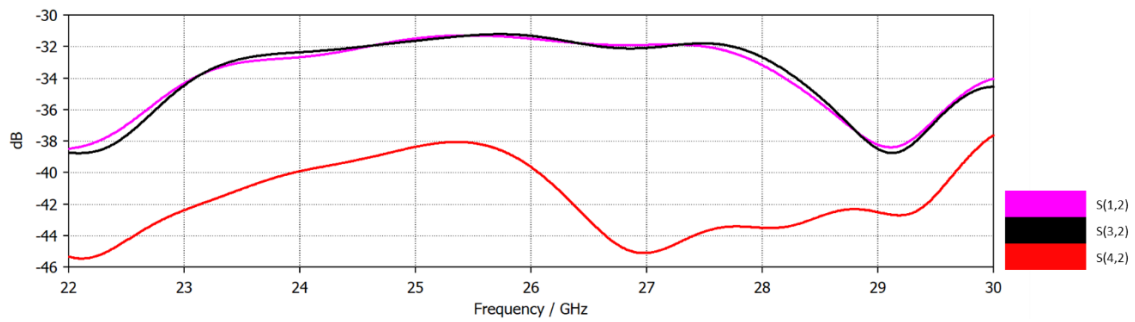


Figura 3-24: Acoplos en el parche 1.

La Figura 3-25 muestra los acoplos producidos en el parche 2 por los parches adyacentes, siendo  $S(1,2)$  y  $S(3,2)$  muy parecidos entre ellos dado que están a la misma distancia.



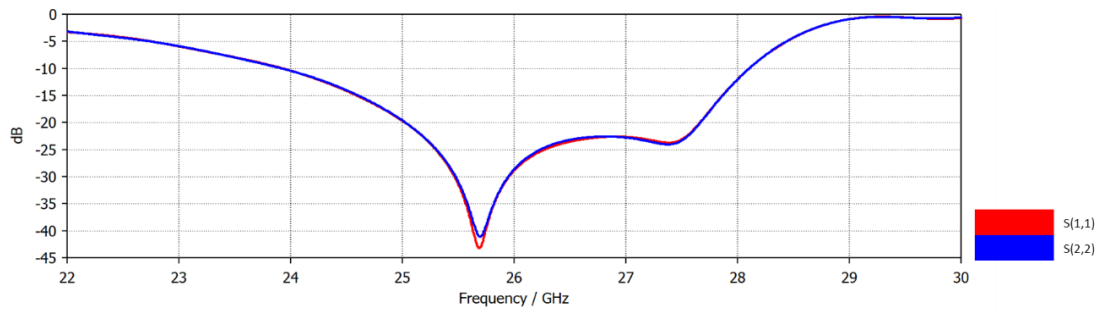


**Figura 3-25: Acoplos en el parche 2.**

### 3.3.2 Adaptación del conjunto de parches

En este punto se conocerá la adaptación de los parches, por simetría del diseño se representarán únicamente el parche 1 y 2 como antes se había mencionado.

Como se puede apreciar en la gráfica de la Figura 3-26 la adaptación es muy similar en ambos parches, y presenta una adaptación parecida a la del elemento unitario en la Figura 3-18.

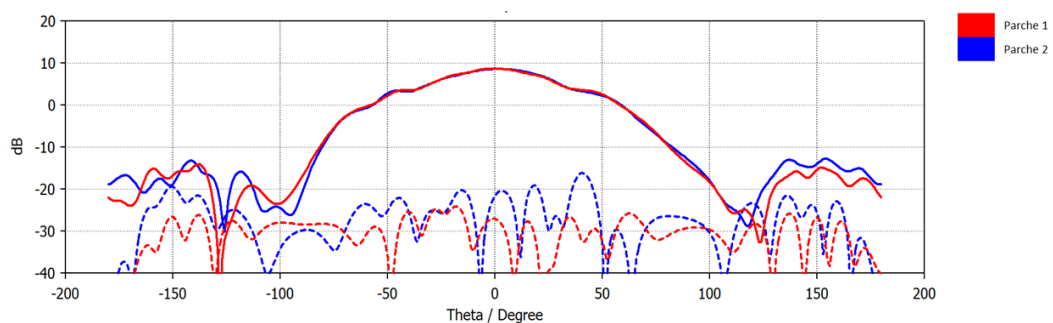


**Figura 3-26: Adaptación parche 1 y 2.**

### 3.3.3 Diagrama de radiación

En esta fase se representará el diagrama de radiación de la Figura 3-23. Partiendo de los cortes con los planos principales, como se ha realizado con el elemento unitario en la parte 3.2.4 de este trabajo.

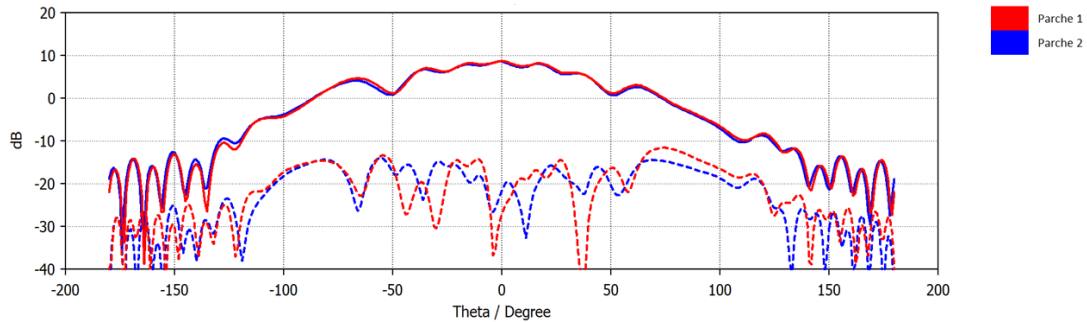
En la gráfica de la Figura 3-27, se puede observar el plano H del parche 1 y 2. En línea continua se representa la componente copolar, que se observa que es asimétrica porque ahora el plano de masa no es simétrico a sendos lados del parche, lo cual provoca una asimetría en el diagrama de radiación. La línea rayada representa la componente contrapolar que aumenta con respecto al elemento unitario por perder la simetría que se comentó anteriormente.



**Figura 3-27: Diagrama de radiación a 26 GHz.**



Ahora se representará el plano E, siguiendo con la misma mecánica que para el plano H, en la línea continua podemos visualizar la componente copolar que mantiene el mismo rizado que el elemento unitario y en la línea discontinua la componente contrapolar.



### 3.4 Red conmutación

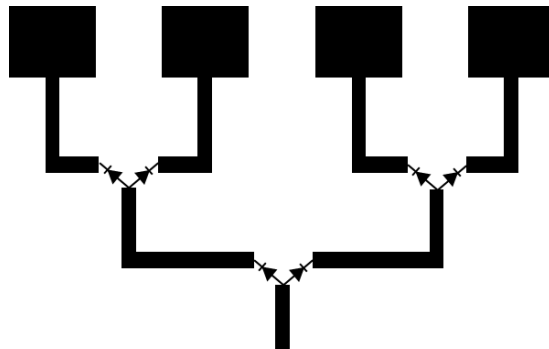
En esta parte se explicará cual es el proceso que se seguirá para el diseño y la creación de la red de conmutación de los alimentadores de la lente.

Se llevó a cabo una red de conmutación utilizando diodos PIN, basándose en otro trabajo realizado en RFCAS donde se usó dicho método [10].

En este trabajo se implementó exitosamente una red de conmutación para una antena a 3,5 GHz. Dicha red utilizaba diodos PIN para efectuar la conmutación en RF. Vistos los buenos resultados de dicho trabajo, el planteamiento inicial es implementar también una red de conmutación basada en diodos PIN para el diseño del parche apilado, que opera a 26 GHz.

#### 3.4.1 Diodos PIN

Un diodo PIN, básicamente es un conmutador de RF controlado por corriente. Cuando se le suministra corriente deja pasar la señal RF, y cuando no, la bloquea. En este apartado lo que se verá es la posibilidad de que sea factible la integración de esta tecnología para la frecuencia a 26 GHz, y se realizarán diseños tanto en ADS como en CST. El diodo PIN utilizado fue el MA4AGFCP910 de Macom.

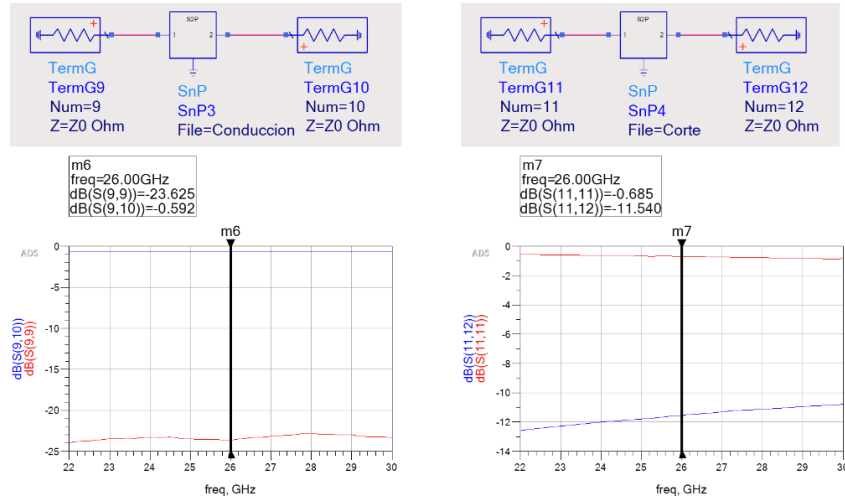


**Figura 3-28: Esquema de diodos PIN en red de alimentación.**

En el esquema anterior (Figura 3-28) se representa la integración de los diodos PIN en una red de conmutación, en él se puede observar que, para 4 parches se debe pasar por 2 diodos PIN para llegar a cualquiera de ellos. Partiendo de este esquema, se procederá a ver el funcionamiento de esos diodos PIN.

El primer paso es representar los parámetros S del diodo PIN, proporcionados por el fabricante, para conocer sus prestaciones a la frecuencia de trabajo de tu antena, para ello se

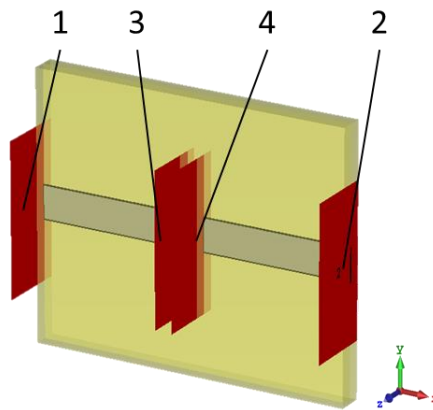
utilizó ADS. Y se probó tanto en corte como en conducción en el rango de frecuencias utilizado.



**Figura 3-29: Parámetros S del diodo PIN proporcionados por el fabricante, para estado de conducción (izquierda) y corte (derecha).**

Una vez visto los parámetros S de los diodos PIN tal cual los da el fabricante los podemos observar que hay unas pérdidas de inserción de 0,592dB a 26 GHz para el estado de conducción, y unas pérdidas de reflexión de 0,685 dB en el estado de corte.

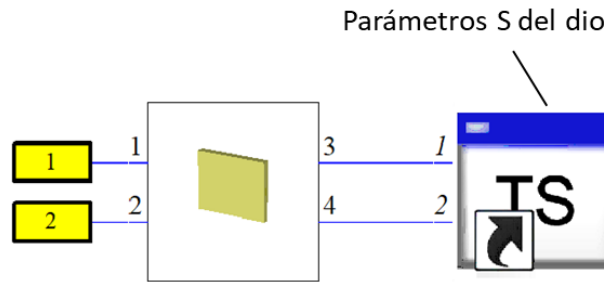
Visto lo anterior se añadirán dichos parámetros en nuestro diseño. Y para ello debemos simularlos en CST, lo primero que se hizo para obtener el comportamiento de los diodos PIN caracterizado por sus parámetros S, fue crear una línea *microstrip* enterrada de 50  $\Omega$  de impedancia, en ella realizar un corte, y en el hueco que deja colocar dos puertos, de esta manera se puede realizar la simulación en un *schematic* de CST. El *schematic* permite realizar una combinación circuital de los parámetros S obtenidos de la simulación electromagnética de la línea *microstrip* con los parámetros S proporcionados por el fabricante, obteniendo así los parámetros S del conjunto.



**Figura 3-30: Línea con diodo PIN.**

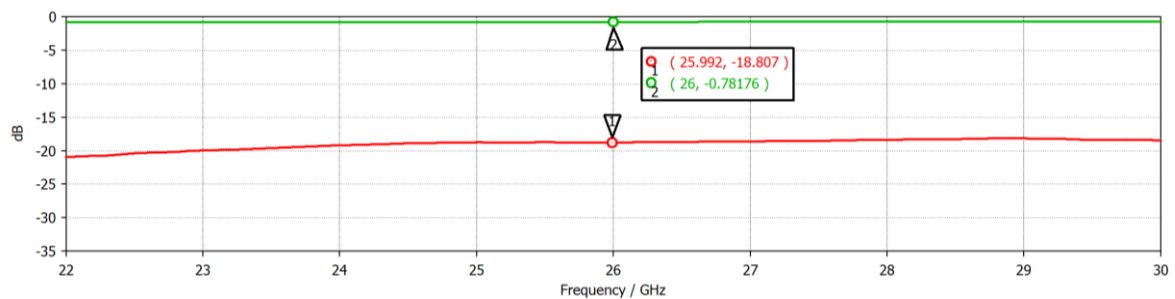
De la siguiente manera, se simuló la línea junto a los parámetros S del diodo PIN, y vemos la reflexión y transmisión que tienen en los extremos de la línea. Como se puede observar en la Figura 3-30, donde el puerto 1 y el puerto 2 son los extremos de la línea y en el puerto 3 y 4 se conectan a los parámetros S del diodo PIN. Por lo tanto, para ver la

reflexión nos fijamos los extremos, eso quiere decir que nos fijamos en  $S(1,1)$  y  $S(2,2)$  que son idénticos, y para ver la transmisión nos fijamos en los en los parámetros  $S(2,1)$  y  $S(1,2)$ .



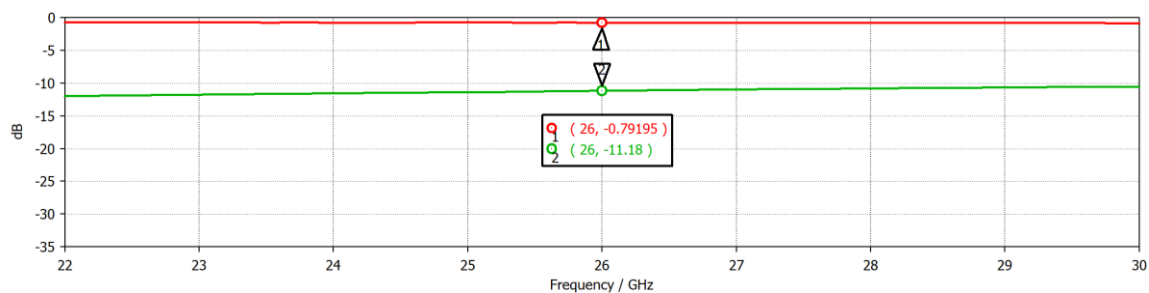
**Figura 3-31: Schematic de línea con diodo PIN.**

Para el estado en conducción tenemos los siguientes resultados, representados en la Figura 3-32 donde la línea roja representa la reflexión y la línea verde la transmisión. Esta gráfica sale de simular la Figura 3-31 con los parámetros S proporcionados por el fabricante.



**Figura 3-32: Diodo PIN en estado de conducción.**

A continuación, se representa en la Figura 3-33 los resultados obtenidos por el diodo PIN en corte del mismo diseño que se usó para el estado de conducción, nuevamente la línea roja es la reflexión y la verde la transmisión que nos devuelve el *schematic*.



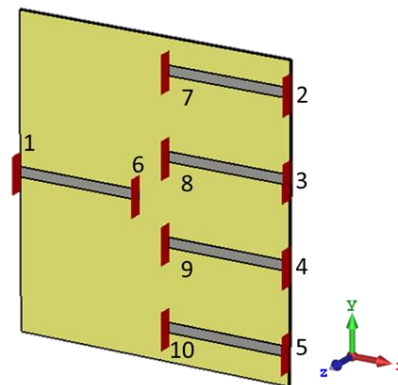
**Figura 3-33: Diodo PIN en estado de corte.**

Resumiendo lo visto en las gráficas anteriores, tenemos que para el caso de conducción se refleja un 1,3% de la potencia total entrante al circuito y se transmite un 83,35% dejando unas pérdidas de disipación de un 15,34% de la potencia entregada. Para el caso de corte tenemos que se refleja un total del 83,3% mientras que la transmisión es del 7,62% dejando así un 9,03% de pérdidas de dispersión.

### 3.4.2 Conmutador

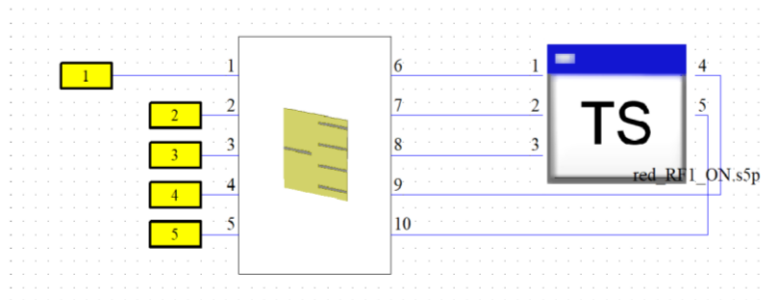
Después de ver el uso de los diodos PIN, se llevó a cabo un diseño de la red de conmutación en la cual se usó un conmutador para altas frecuencias MASW-011087-DIE de

Macom. Para ello se probó dicho conmutador caracterizado por sus parámetros S junto con 5 líneas de transmisión, teniendo así una matriz 5x5, y teniendo en los extremos de las líneas puertos, en los que después se añadirán los parches, como muestra la Figura 3-34.



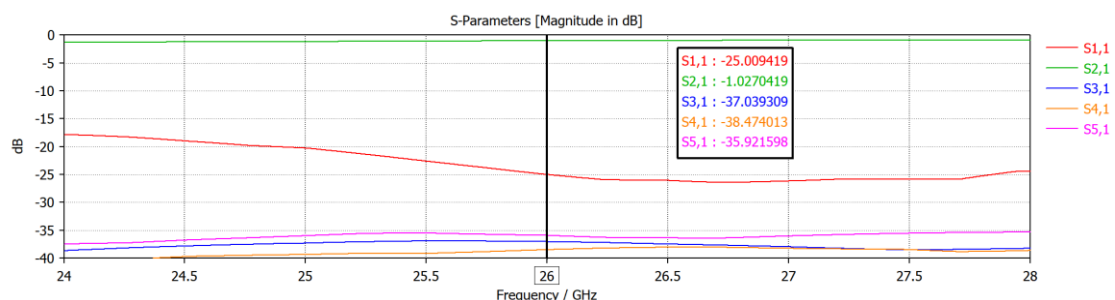
**Figura 3-34: Líneas *microstrip* para el conmutador.**

Para saber cómo va a ser el funcionamiento del conmutador junto a las líneas *microstrip* conectadas a sus pads, lo primero que se va a probar es la matriz de parámetros S del conmutador como se muestra en la Figura 3-34, donde los puertos 1, 2, 3, 4 y 5 son los extremos de las líneas.



**Figura 3-35: Schematic líneas con conmutador.**

En la siguiente gráfica se muestra el funcionamiento de la línea y la caracterización del conmutador. Se debe tener en cuenta la línea que esta activada es la que tiene en su extremo el puerto 2. Por lo tanto, al fijarnos en el parámetro  $S(2,1)$  vemos que las pérdidas de inserción que se obtienen al estar activada la línea deseada y dichas pérdidas son de 1.03 dB, mientras que la transmisión a las líneas que no están activadas no supera los -35 dB, la reflexión que tenemos para esta simulación es menor que -17 dB en toda la banda.



**Figura 3-36: Parámetros S de líneas más conmutador.**

### 3.4.3 Comparativa diodos PIN vs conmutador

Visto los puntos anteriores, se decidió descartar el uso de los diodos PIN para la creación de la red de conmutación, ya que para un diseño de 4 parches se deberían usar 6 diodos PIN, con su respectiva alimentación, montaje y también hay que tener en cuenta que las pérdidas que se tienen usando esta metodología son mayores que las que se tendrían si se usa el conmutador para altas frecuencias, como se verá más adelante en este punto.

A continuación, se presentará una tabla donde se muestran en porcentaje la potencia que llega al puerto de interés (la antena que se quiere activar), la potencia entregada a otros puertos, y por último la potencia que se disipa en el componente.

| Comparativa PIN vs Conmutador | Potencia entregada al puerto de interés | Potencia entregada al resto de puertos | Potencia disipada (pérdidas) |
|-------------------------------|---|--|------------------------------|
| PIN conducción                | 83,3%                                   | 1,3%                                   | 15,4%                        |
| PIN corte                     | 83,3%                                   | 7,6%                                   | 9,1%                         |
| Conmutador                    | 78,3%                                   | 0,4%                                   | 21,3%                        |

Teniendo estos datos presentes, hay que recalcar que para activar un parche se precisan dos diodos lo que hace que la potencia que llega al parche que se desea excitar no sea de 83,3% sino de un 68,9%, dejando una diferencia de casi un 10% con respecto al conmutador, por lo tanto, un diseño basado en conmutador permitirá lograr una antena con mayor eficiencia.

### 3.4.4 Conjunto de parches con conmutador de RF

Una vez queda visto como queda como el comportamiento de los parámetros S, se cambian los puertos de los extremos por los parches. Quedando un diseño como el que se muestra a continuación en la Figura 3-37. Teniendo una línea para colocar el conector, 5 puertos para añadir los parámetros S que caracterizan el comportamiento del conector y 4 elementos unitarios.

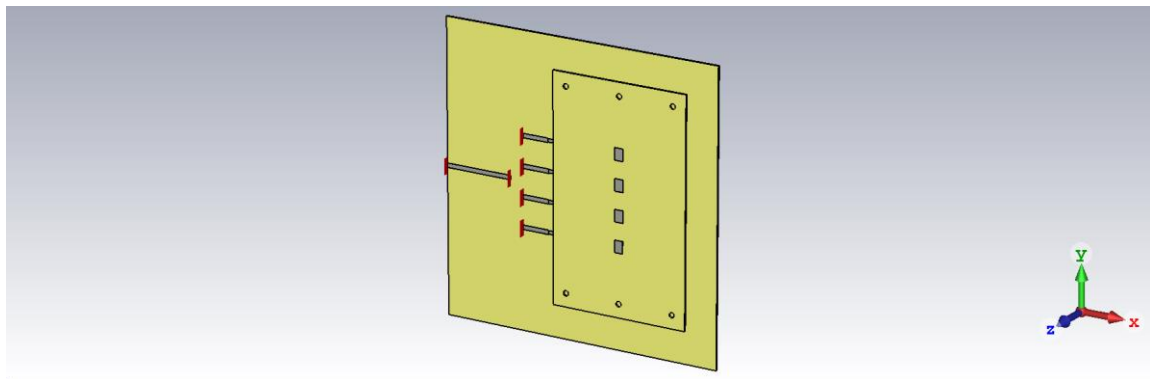
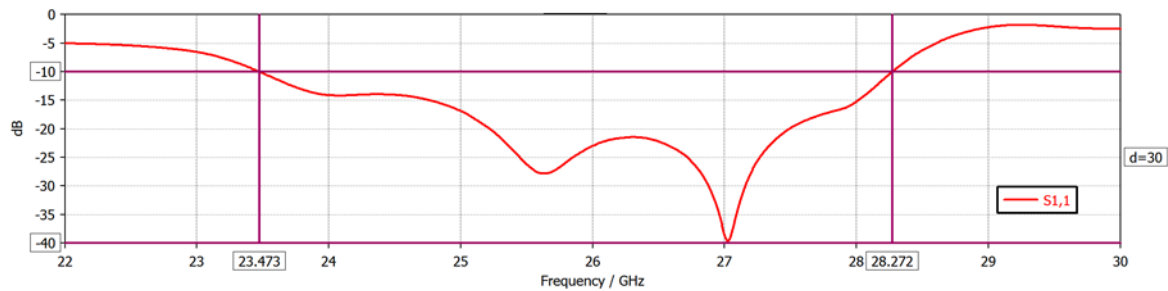


Figura 3-37: Líneas con conmutador y parches.

Simulando el diseño de la imagen anterior (Figura 3-37) se obtiene la siguiente adaptación, que refleja un ancho de banda de 4.8 GHz a -10 dB. Hay que tener en cuenta que solo esta activado el uno de los parches y los otros 3 no funcionan. La adaptación es muy similar en todos los parches.



**Figura 3-38: Adaptación de líneas con conmutador y parches.**

### 3.4.5 Observaciones sobre el ensamblaje del conmutador de RF

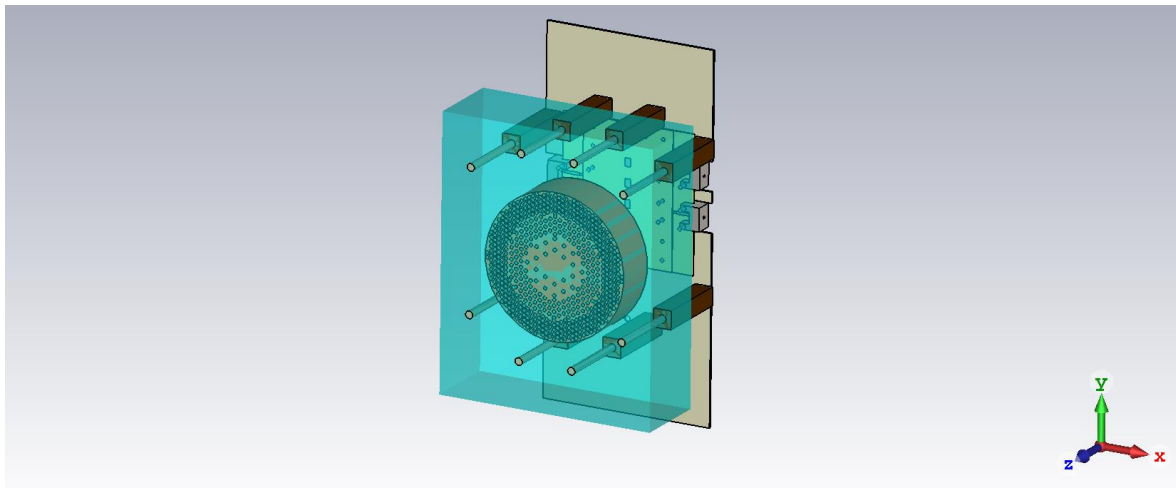
El tamaño del conmutador es de 2,1x1,5mm, por lo tanto, se necesita un proceso de montaje específico como es el *wire bonding*, que es uno de los métodos más utilizados para llevar a cabo conexiones entre los circuitos integrados y la placa de circuitos impresos.

Por ello, para implementar el conmutador será necesario recurrir a una empresa externa, y esto se realizará de cara a trabajos futuros.

### 3.5 Diseño final

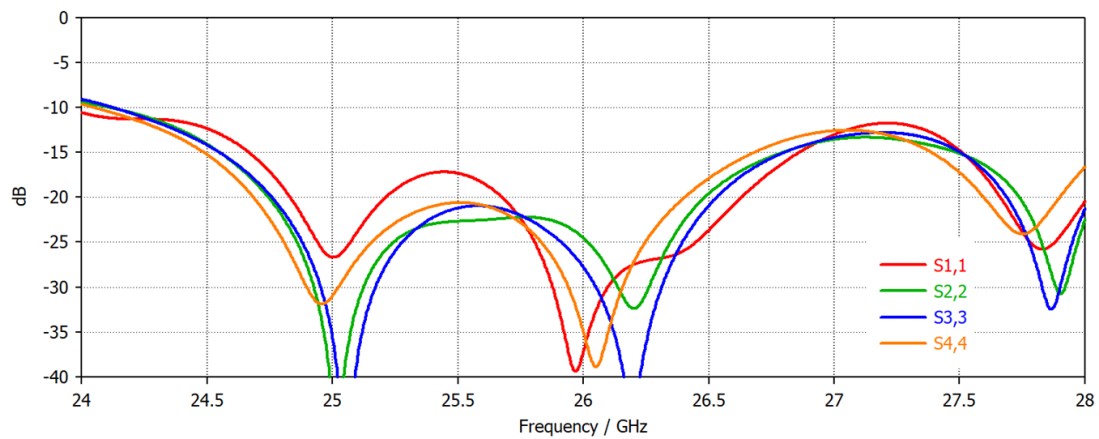
En esta última etapa del diseño se verá cual ha sido el comportamiento que ha tenido el diseño final, que como se comentó anteriormente no tiene ningún elemento de conmutación, sino que se va a implementar cuatro elementos radiantes, y la conmutación se realizará de manera manual.

Esto será suficiente para comprobar el buen funcionamiento del conjunto parches-lente, y que como antes se ha mencionado, la antena con conmutación electrónica se dejará para trabajos futuros.



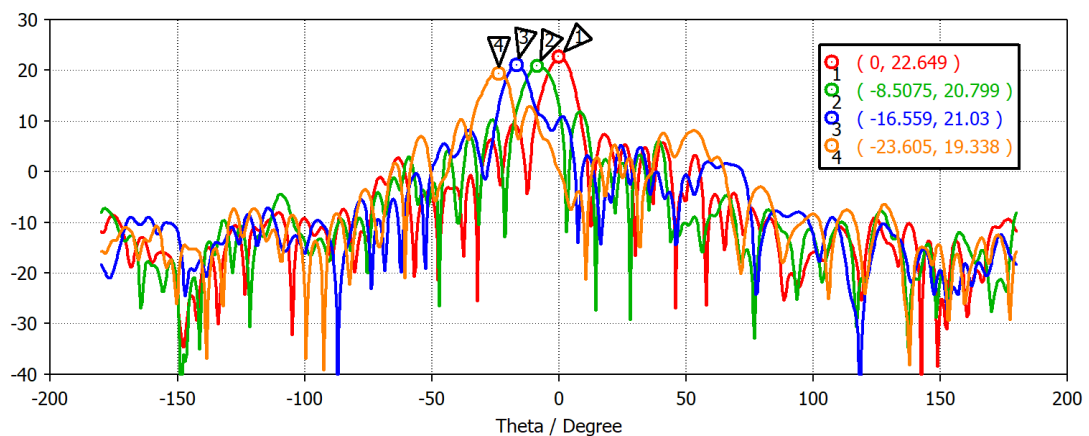
**Figura 3-39: Diseño final con estructura para lente.**

Como se observa en la gráfica Figura 3-40 tenemos una adaptación a -10dB en toda la banda de 24 a 28GHz, se ve también que la adaptación tiene ligeras diferencias para cada una de las antenas que se muestran en la Figura 3-39, pero sigue una misma forma y todas ellas tienen el mismo ancho de banda.



**Figura 3-40: Adaptación de los 4 parches**

Ahora se representará la componente copolar del plano H en la Figura 3-41, para los 4 parches para ver que el desapuntamiento que nos da la lente.



**Figura 3-41: Componente copolar en el plano H.**

Como se puede observar, en la gráfica de la Figura 3-41, el apuntamiento varía en función del parche que este iluminando la lente. Además, hay que destacar la ganancia que tiene cada parche con su lente, que si lo comparamos con la ganancia de la Figura 3-21, que representaba únicamente el elemento unitario, superando para el parche 1 (línea en rojo) los 20 dB.





## 4 Fabricación y resultados experimentales

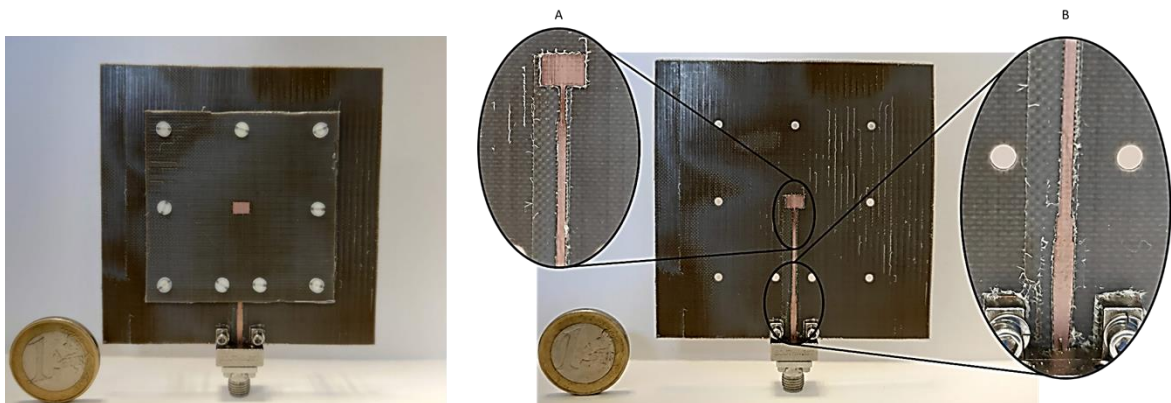
### 4.1 Fabricación

En este apartado del trabajo se verá detalladamente como ha sido el proceso de construcción del conjunto de parches. Hay que recalcar que ha sido un proceso difícil debido a que las medidas que se manejan son muy pequeñas, dieléctricos finos y por limitaciones de los equipos y de los materiales empleados, la dificultad de este proceso se ha visto aumentada considerablemente.

Inicialmente se explicará la construcción del elemento unitario, a continuación, se verá cómo ha sido la fabricación del conjunto de parches y por último la integración de la lente con su estructura.

#### 4.1.1 Elemento unitario

En este punto se analizará la construcción del elemento unitario, teniendo ésta dos partes, el sustrato inferior con las líneas de adaptación y el parche inferior, y la parte superior. Los dos sustratos se unen con tornillos de nylon (los de metal afectan más a la radiación), el conector de alimentación de 50 ohm es un conector tipo *End Launch*, modelo 292-04A-6 de Southwest.



**Figura 4-1: Elemento unitario fabricado (izquierda), parche inferior fabricado (derecha).**

En la Figura 4-1 se puede ver cómo queda el elemento unitario final, aunque se mostrará cada uno de los puntos, se puede observar el pequeño tamaño del parche y algunas imperfecciones en el sustrato. Hay que recalcar que la fabricación del parche superior es mucho más complicada que la de la parte inferior, ya que el sustrato de la parte superior no tiene cobre por debajo (plano de masa).

Por lo tanto, el parche superior es más endeble, esto quiere decir que cuando pasa la fresadora quitando el cobre de la capa *top*, puede pasar lo siguiente:

- El sustrato se hunde, se taladra.
- Quita menos cobre o más sustrato de lo deseado.
- El espesor del sustrato no es uniforme.

Lo que hace que el proceso de fabricación sea más complicado. Aun así, se tuvo que manipular la fresadora bajando manualmente la fresa para no tener los problemas mencionados.

Como se ha ido viendo a lo largo de este trabajo, el sustrato inferior alberga el conector, líneas de alimentación y adaptación y el parche inferior. En la Figura 4-1(izquierda) es difícil distinguir entre las anchuras de las pistas, dado que la diferencia entre ellas es pequeña, para facilitar esto se ha hecho un zoom (A, B) para poder distinguir cada una de las partes.

Como se puede ver en la Figura 4-1, en el zoom A se puede observar el parche inferior con la línea de  $\lambda_w/2$  y un tramo de la línea que mantiene la impedancia hasta que deja de ser una línea enterrada. En el zoom B se percibe como acaba la línea que mantenía los  $67\Omega$  y a continuación el  $\lambda/4$  que adapta eso  $67\Omega$  a los  $50\Omega$  del conector, a continuación de la línea de adaptación se encuentra la línea de  $50\Omega$  con un taper para que no se produzca un cortocircuito entre el conductor interior y exterior del conector coaxial.

#### 4.1.2 Conjunto de parches más lente

La fabricación ha sido similar a la del parche unitario, presentando las mismas dificultades. En la Figura 4-2 se muestra el conjunto de parches realizado. Para realizar la medida de este conjunto de parches con la lente se ha diseñado una estructura de ensamblaje. El conjunto de parches se fija a una placa de FR4, de la cual salen unos separadores impresos en 3D que van a permitir situar la lente a la distancia focal necesaria respecto de los parches. En cuanto a la lente, irá incrustada en unas planchas de *porexán* o *foam*, las cuales se fijarán a los separadores antes comentados.

Hay que recalcar que los conectores eran más grandes que la separación que debía tener cada antena entre ellas, por lo tanto, se realizó la distribución que refleja la imagen de la Figura 4-2.

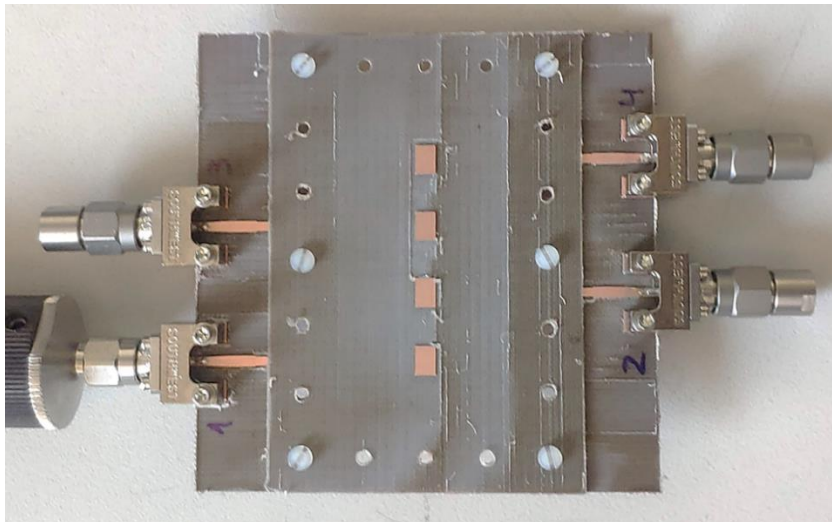
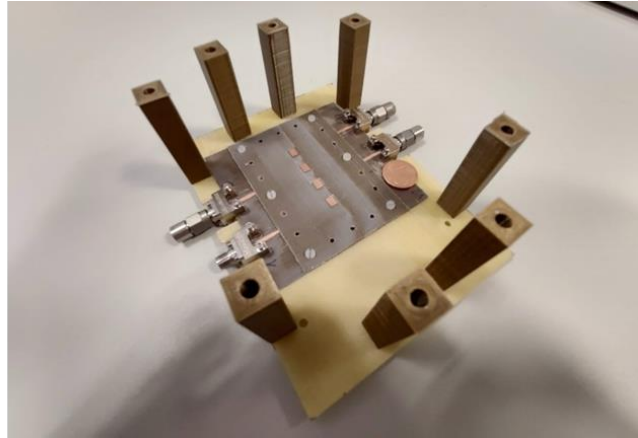
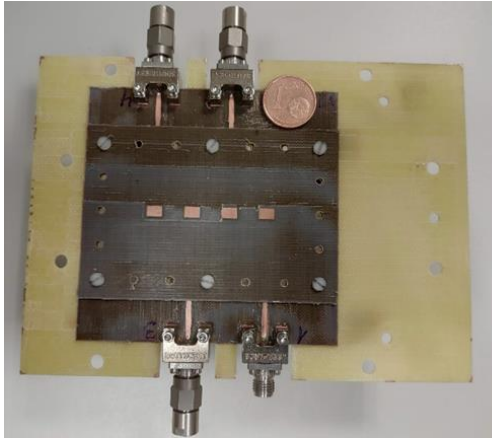


Figura 4-2: Conjunto de parches fabricados.

##### 4.1.2.1 Conjunto de parches

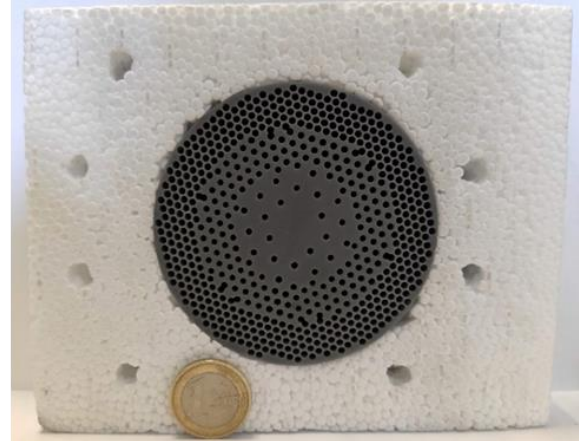
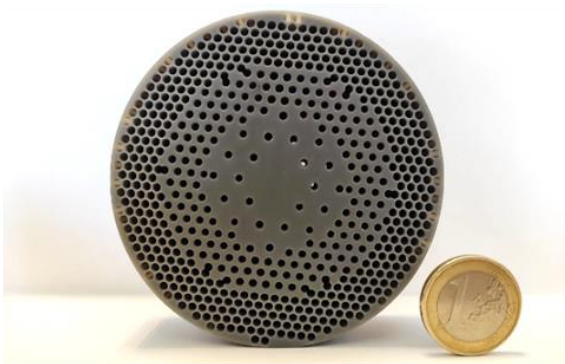
En la Figura 4-3 a la izquierda se muestra el conjunto de parches con la estructura de FR4, a la derecha se puede ver el conjunto de parches se puede observar el soporte de FR4 que ayudará a la sujeción de la lente. A la derecha en la Figura 4-3, se puede observar el conjunto de parches y el sustrato, más los topes que se utilizaron para la separación de la lente.



**Figura 4-3: Conjunto de parches con estructura de sujeción de lente.**

#### **4.1.2.2 Lente**

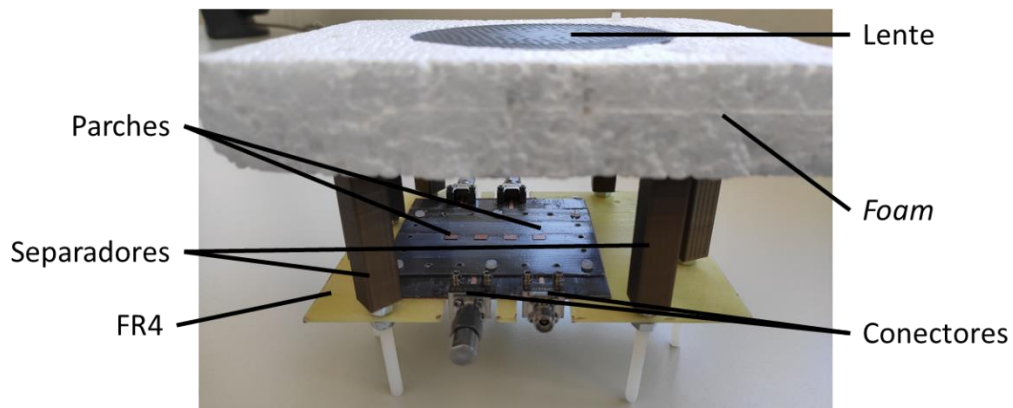
La lente que se representa en la Figura 4-4 a la izquierda y se recuerda que se diseñó anteriormente en el grupo RFCAS. Es una lente de tipo *grin*, se imprimió con una impresora 3D en un material dieléctrico de constante dieléctrica 2,5. Los taladros visibles en la foto consiguen disminuir progresivamente la constante dieléctrica hacia el exterior de la lente. Están diseñados de tal manera que si la lente es iluminada desde su centro (por ejemplo, por uno de los parches diseñados), generará una onda en su apertura con fase uniforme, radiando así en dirección broadside. Si la lente es iluminada por un parche fuera de su centro geométrico, entonces la onda generada en su apertura presentará un desfase progresivo, produciendo un diagrama de radiación con un cierto desapuntamiento respecto de broadside.



**Figura 4-4: Lente (izquierda), Lente con *foam* (derecha).**

Aprovechando de que el *foam* tiene una constante dieléctrica muy similar a la del aire, se utilizó para sujetar la lente como se puede apreciar en la Figura 4-4 a la derecha.

Se puede apreciar en la foto 8 agujeros en el *foam*, estos serán para emparejar la estructura del conjunto del parche con el *foam* y la lente. Para emparejar las dos partes se usaron tornillos de nylon y separadores para alejar los parches de la lente.



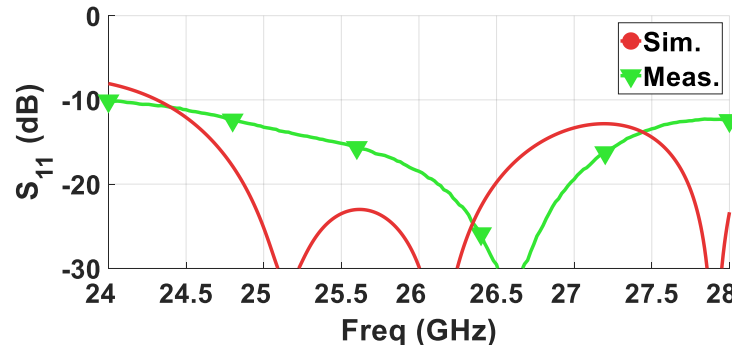
**Figura 4-5: Conjunto de parches con estructura y lente.**

## 4.2 Resultados experimentales

En este apartado se hará una comparativa entre los resultados obtenidos de las simulaciones y los de los elementos construidos. Para realizar las medidas de adaptación se usó el nuevo analizador de redes de la EPS, y para realizar las medidas de radiación se tuvieron que realizar en la universidad de Granada dado que la cámara anecoica aún no trabaja a las frecuencias que se manejan en este TFG.

### 4.2.1 Elemento unitario

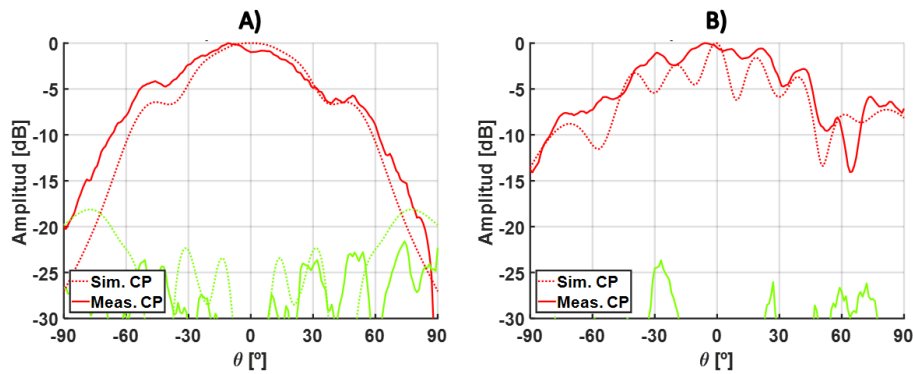
En la siguiente gráfica (Figura 4-6) se puede apreciar la diferencia que hay entre el parche simulado y el resultado del parche medido.



**Figura 4-6: Adaptación del parche unitario, simulación vs fabricación.**

Como se puede observar en la simulación hay una diferencia apreciable, no obstante, se mantiene el ancho de banda que se había diseñado para la adaptación mejor que -10 dB, e incluso se obtiene una banda mayor a -15 dB. Esto puede deberse a que la fabricación no ha sido lo suficientemente precisa, y en algunos puntos el sustrato variaba ligeramente su espesor, cambiando de este modo la distancia entre sustrato superior e inferior, y como se vio en la parte de diseño (3.2.2) la separación era la variable más crítica con la adaptación el diseño.

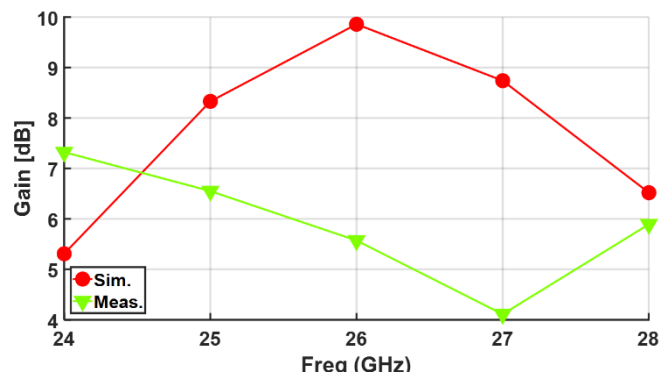
Ahora se verá cómo ha sido la radiación del parche fabricado con respecto al diagrama de radiación obtenido en CST a la frecuencia de trabajo que se recuerda que es 26 GHz, se separarán en los dos planos principales en la Figura 4-7 en A) se representa el plano H y en B) el plano E y en rojo se muestra la componente copolar y en verde la componente contrapolar.



**Figura 4-7: Diagrama de radiación A) Plano H, B) Plano E a 26 GHz.**

Se puede ver que en el plano H se ha desplazado, aunque sigue manteniendo su forma, para el plano E se ve que los nulos se han rellenado y que el rizado se sigue manteniendo.

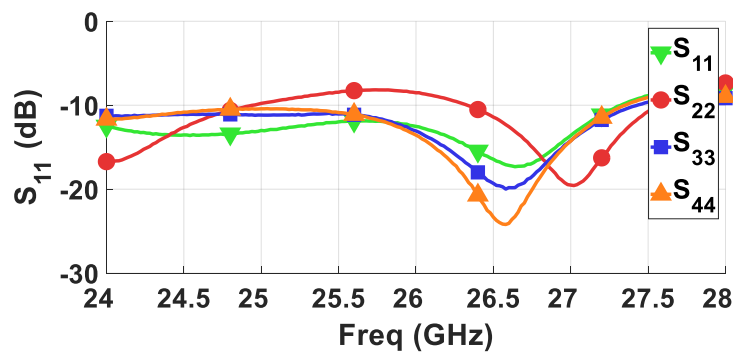
En la Figura 4-8 se puede apreciar que hay grandes diferencias en la medida de ganancia, esto se puede deber a que el sistema de medida en la cámara anecoica de Granada se estaba instalando cuando se fue a medir la antena, por lo que quizá se ha cometido algún error en la medida y nos gustaría volverla a repetirla.



**Figura 4-8: Ganancia del parche.**

#### 4.2.2 Conjunto de parches con lente

Visto como han salido las simulaciones del elemento unitario, ahora queda analizar cuál ha sido el comportamiento del conjunto de parches con la lente. Se empezará como en el por la adaptación que tiene el conjunto de parches que representa la Figura 4-9.



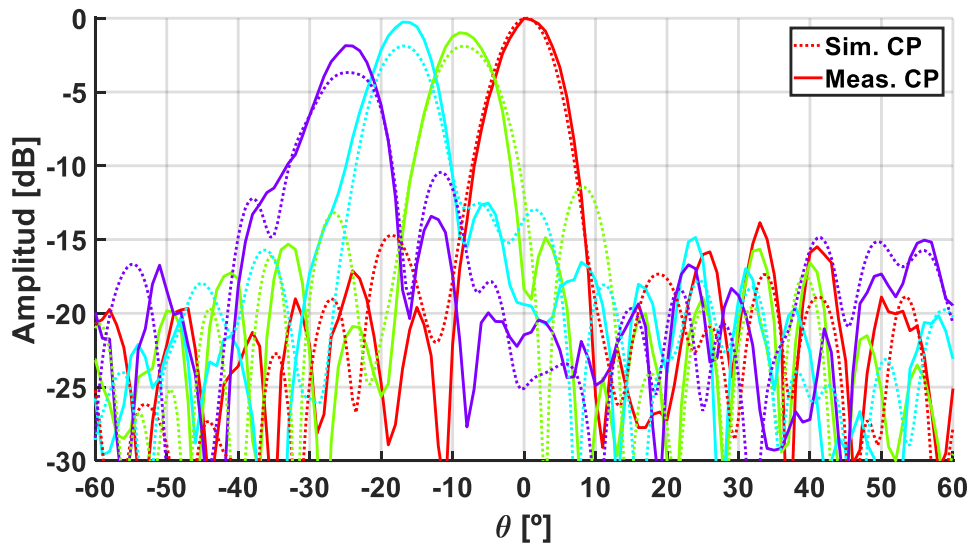
**Figura 4-9: Medición del conjunto de parches en adaptación**



Se puede observar en la Figura 4-9 que la adaptación del conjunto de parches es similar a la simulación obtenida en CST (Figura 3-26). En el puerto 2, que viene representado en la gráfica con la línea roja, se puede observar que es ligeramente diferente que la simulación, esto se debe a que el sustrato superior en la zona del parche 2 sufrió un rebaje mayor.

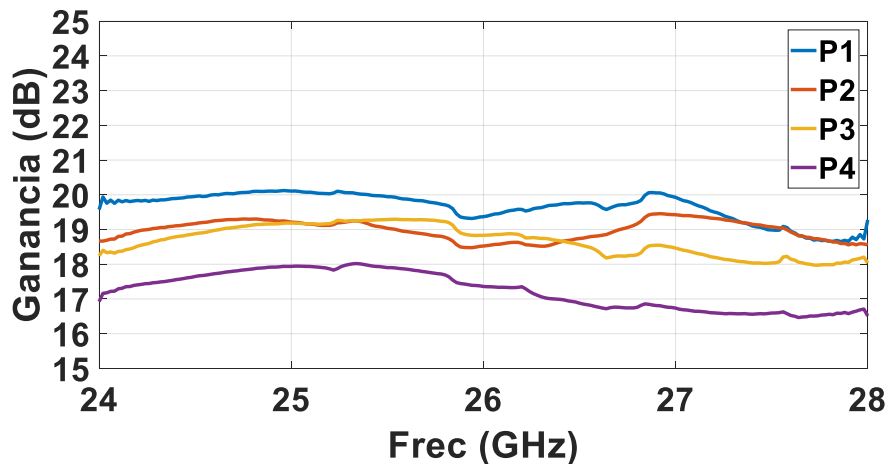
A continuación, podemos observar que la Figura 4-10 representa el plano H dejando ver que la dirección de apuntamiento de cada parche es la misma que la simulada y que la ganancia obtenida es inferior en todos los parches excepto para el parche 1, que da el mismo resultado de ganancia que en la simulación.

Por lo tanto, se confirma el desapuntamiento de la antenna en función de qué parche se excita, y se observan algunas diferencias de ganancia medida con respecto a la de la simulación. Estas diferencias se deben a que las pérdidas en dieléctricos no se contemplaron en las simulaciones, y también a errores de posicionamiento entre la lente y los parches, que se tratarán de resolver de cara a futuras implementaciones.



**Figura 4-10: Diagrama de radiación de la antenna completa en plano H a 26 GHz.**

Para ver en más detalle la ganancia que tiene el conjunto de parches más la lente se muestra en la gráfica de la Figura 4-11, cual es la ganancia que obtenemos en todo el ancho de banda que ofrece el conjunto.



**Figura 4-11: Ganancia del conjunto de parches con lente.**

## 5 Conclusiones y trabajo futuro

---

### 5.1 Conclusiones

En el presente Trabajo de Fin de Grado se ha conseguido realizar con éxito el proceso de diseño de una antena y una red conmutada funcionando a 26 GHz, para conseguir una antena con apuntamiento variable y alta directividad. Asimismo, se ha realizado la fabricación y medida de un elemento unitario, así como de un conjunto de parches apilados para su medida en conjunto con la lente ya disponible

La principal idea es usar la tecnología *microstrip* para crear una antena a una frecuencia de 26GHz y de esta manera estudiar la posibilidad de utilizar antenas de parche como un elemento alimentador de una lente. Una vez se ha diseñado la antena a la frecuencia de diseño, el siguiente paso era diseñar una red de conmutación, capaz de elegir un parche entre otros para que ilumine a la lente, este último proceso, se realizó solamente a nivel de diseño, ya que, debido a la complejidad de implementación del circuito integrado del conmutador, este proceso deberá realizarse en instalaciones externas a la Escuela. También se hizo una comparativa de que elemento utilizar para dicho sistema de conmutación.

Al no poder fabricar la red de conmutación, se realizó un diseño con cuatro puertos que alimentan a 4 parches y para realizar las medidas de este trabajo se cambiaba manualmente la alimentación al conector del parche con el cual se quería iluminar la lente.

Los resultados obtenidos son muy satisfactorios sobre todo en el diagrama de radiación, que se han conseguido objetivos como los poder visualizar los desapuntamientos y obtener un aumento considerable de ganancia, gracias a la lente.

Recalcar también el poder construir elementos radiantes con una tecnología de circuitos impresos a estas elevadas frecuencias, en la EPS, aun teniendo sus complejidades, se puedo llevar a cabo la fabricación no solo del elemento radiante sino de un conjunto de ellos.

### 5.2 Trabajo futuro

Para continuar con este Trabajo de Fin de Grado se debería implementar la red de conmutación e implementar un conjunto de 7 elementos para para poder desapuntar de manera simétrica respecto de broadside.

También idear un sistema de fijación entre la lente y el parche más robusto para que los resultados experimentales sean más fiables.





# Referencias

---

- [1] J. L Masa-Campos, “Tema 2. CONCEPTOS BÁSICOS DE ANTENAS (Fuentes Interferentes Radiantes)”, Asignatura; Antenas y Compatibilidad Electromagnética, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, pp. 5, 2017.
- [2] J. L Masa-Campos, “Tema 2. CONCEPTOS BÁSICOS DE ANTENAS (Fuentes Interferentes Radiantes)”, Asignatura; Antenas y Compatibilidad Electromagnética, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, pp. 16, 2017.
- [3] J. L Masa-Campos, “Tema 2. CONCEPTOS BÁSICOS DE ANTENAS (Fuentes Interferentes Radiantes)”, Asignatura; Antenas y Compatibilidad Electromagnética, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, pp. 16-17, 2017.
- [4] J. Córcoles-Ortega, “Tema 1. Conceptos básicos de electrónica de Electrónica de Comunicaciones”, Asignatura: Electrónica de Comunicaciones, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, 2017.
- [5] J. L Masa-Campos, “Tema 3. ANTENAS LINEALES E IMPRESAS”, Asignatura; Antenas y Compatibilidad Electromagnética, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, pp. 10-15, 2017.
- [6] J. L Masa-Campos, “Tema 3. ANTENAS LINEALES E IMPRESAS”, Asignatura; Antenas y Compatibilidad Electromagnética, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, pp. 9, 2017.
- [7] J. L Masa-Campos, “Tema 2. CONCEPTOS BÁSICOS DE ANTENAS (Fuentes Interferentes Radiantes)”, Asignatura; Antenas y Compatibilidad Electromagnética, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, pp. 21-26, 2017.
- [8] J. L Masa-Campos, “Tema 2. CONCEPTOS BÁSICOS DE ANTENAS (Fuentes Interferentes Radiantes)”, Asignatura; Antenas y Compatibilidad Electromagnética, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, pp. 46, 2017.
- [9] J. L Masa-Campos, “Tema 3. ANTENAS LINEALES E IMPRESAS”, Asignatura; Antenas y Compatibilidad Electromagnética, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, pp. 9, 2017.
- [10] Paula Paloma Sánchez Dancausa “DISEÑO DE ARRAY CONFORMADO DE DOBLES PARCHES APILADOS PARA COMUNICACIONES WiMAX Y COBERTURA OMNIDIRECCIONAL O SECTORIAL NO SIMULTÁNEA”, Trabajo Fin de Master, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid. 2016



## **Glosario**

---

|       |   |
|-------|---|
| CST   | Computer Simulation Technology                |
| ADS   | Advanced Design System                        |
| MIMO  | Multiple input multiple output                |
| EPS   | Escuela Politécnica Superior                  |
| RFCAS | Radio Frecuencia circuits, antennas & systems |
| TFG   | Trabajo de Fin de Grado                       |

